Брайан Грин
Элегантная вселенная (суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории)

Брайан Грин

Элегантная вселенная (суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории)

Перевод с английского под общим руководством академика РАН С.С.Герштейна.

Научный редактор канд. физ.-мат. наук В.О.Малышенко.

Выдержки из рецензий на книгу Брайана Грина «Элегантная Вселенная»

Грин затрагивает потрясающее количество тем, излагая их простым и ясным языком без математических выкладок и технических подробностей… Это образец научного повествования… Трудно не заразиться хоть отчасти его энтузиазмом и возбуждением.

The Philadelphia Inquirer

В высшей степени захватывающая книга… Грандиозный успех… Грин изложил теорию струн доступно и без формул; объяснил, почему струны так воодушевляют их приверженцев. Заслуга Грина в том, что мы почувствовали себя комфортно в холодно-абстрактном мире струн, и он убедил нас, что этот мир нужно принять серьезно.

Sunday Telegraph (London)

Грин пишет ясно и энергично, талантливо находя живые, часто веселые образы для абстрактных научных принципов. Он пишет со страстью человека, горящего желанием доказать справедливость теории суперструн, потому что он вдохновлен ее красотой.

Chicago Tribune

Содержательная и важная книга… Элегантная Вселенная рассказывает… о теории струн с ясностью и шармом. Это и личный рассказ, и история о грандиозном интеллектуальном движении.

Scientific American

Теория струн – самая захватывающая идея со времен, когда Стивен Хокинг заглянул внутрь черных дыр. Грин излагает ее так, что понять это может каждый.

San Francisco Chronicle

Грин проделал великолепную работу, изложив идею теории струн понятным языком.

Это поразительно ясный и хорошо написанный рассказ об удивительных следствиях для структуры пространства-времени, вытекающих из теории.

New Scientist

Замечательная книга. Грин привнес захватывающую идею научных изысканий в реальную жизнь.

Nature

Книга Брайана Грина – самая последняя из нанизанных на струну (простите!), которую изначально заставил звучать Стивен Хокинг, и к тому же самая лучшая.

London Morning Star

Метафоры Грина часто придают красоту и силу идеям, непостижимым другими способами. Элегантная Вселенная – стоящее чтение… Эйнштейн бы одобрил.

Discover Magazine

Брайан Грин сделал жутко сложную теорию струн доступной каждому. Он обладает поразительным талантом использовать обыденные образы для иллюстрации того, что может происходить в размерностях, выходящих за рамки человеческого восприятия.

Publishers Weekly

Со времен необычайного успеха Краткой истории времени ни одна научная книга не привлекала такого внимания.

Sunday Times (London)

Брайан Грин заманивает читателя на передний край физики своей обворожительной прозой.

The Christian Science Monitor

Это – хорошо написанный отчет с переднего фронта физики и астрономии.

American Scientist

Грин обладает удивительным даром объяснять самые передовые научные идеи так, что каждый может оценить его свежий и проницательный взгляд.

Astronomy Magazine

Элегантная Вселенная – выдающаяся книга, ставшая классикой научного объяснения. Со временем теория [струн] может повлиять на само наше понимание красоты.

The New York Times

Грин жаждет поделиться с широкой читательской аудиторией своим пониманием теории струн и выявить ее сильные стороны. И он действительно достигает этого, освещая историю и проблемы современной физики.

Science News

Невозможно оторваться от чтения Элегантной Вселенной. Грин грозится сделать для теории струн то, что Стивен Хокинг сделал для черных дыр.

New York

Грин пишет с поэтическим красноречием и вкусом. Достойна восхищения его работа по переводу чисто математических усилий

в наглядные образы.

The Washington Post Book World

Излагает новые открытия одно за другим… Продолжая лучшие традиции ученых-физиков, пишущих для широкой аудитории, Элегантная Вселенная устанавливает стандарт, который будет трудно превзойти.

The New York Times Book Review

С любовью и благодарностью

моей матери

и в память о моем отце

Предисловие

Последние тридцать лет своей жизни Альберт Эйнштейн провел в неустанном поиске

так называемой единой теории поля – теории, которая смогла бы объединить все взаимодействия, существующие в природе, в единую, всеобъемлющую и непротиворечивую систему. Мотив, лежащий в основе его поиска, не был связан напрямую с тем, что мы обычно подразумеваем под научной деятельностью, например, с попыткой объяснить те или иные конкретные экспериментальные данные. Им двигала страстная вера в то, что достигнув глубочайшего понимания мироздания, мы сможем проникнуть в его самую сокровенную тайну – простоту и мощь принципов, лежащих в его основе. Эйнштейн хотел раскрыть устройство Вселенной с доселе неведомой ясностью, заставив нас застыть в благоговейном изумлении перед ее совершенной красотой и элегантностью.

Эйнштейн не смог осуществить свою мечту. Во многом из-за того, что путь закрывали объективные обстоятельства: в его время некоторые важные свойства материи и взаимодействий либо оставались неизвестными, либо, в лучшем случае, были не до конца осознаны. Однако в течение последнего полувека физики все новых и новых поколений, добиваясь успехов и терпя неудачи, временами попадая в тупики, продолжали, основываясь на открытиях своих предшественников, добиваться все более полного понимания принципов устройства мироздания. И вот теперь, спустя много лет после того, как Эйнштейн объявил о своем походе на поиски единой теории, из которого он вернулся с пустыми руками, физики считают, что они смогли наконец выработать теорию, связывающую все эти догадки в единое целое, – единую теорию, которая в принципе способна объяснить все явления. Эта теория, теория суперструн, и является предметом данной книги.

Я написал Элегантную Вселенную в попытке описать замечательные открытия, родившиеся на переднем крае физических исследований, и сделать их доступными широкому кругу читателей, особенно тем из них, кто не имеет достаточной подготовки в физике и математике. Читая в течение последних нескольких лет публичные лекции по теории суперструн, я стал свидетелем растущего стремления понять, что говорят современные исследования о фундаментальных законах мироздания, почему эти законы ведут к радикальному изменению наших представлений о Вселенной, какие проблемы остались нерешенными в нашем непрерывном поиске окончательной теории. Я надеюсь, что мои рассказы об основных достижениях, которых добились физики со времен Эйнштейна и Гейзенберга, и описание бурного прогресса, свидетелями которого мы стали на рубеже столетий, обогатят ваши знания и удовлетворят ваше любопытство.

Я также рассчитываю, что Элегантная Вселенная будет интересна читателям, имеющим определенную научную подготовку. Я надеюсь, что эта книга поможет студентам, изучающим естественные науки, и их преподавателям в понимании некоторых основополагающих положений современной физики, таких как специальная и общая теория относительности и квантовая механика, и, в то же время, сможет заразить их энтузиазмом исследователей, ведущих поиск долгожданной единой теории. Любителям научно-популярной литературы я попытался объяснить многие из удивительных достижений в понимании основ мироздания, которого ученые добились в последнем десятилетии. Что касается моих коллег, работающих в других научных дисциплинах, я надеюсь, что эта книга даст им правдивое и взвешенное объяснение того, почему специалисты по теории струн испытывают такой энтузиазм в отношении прогресса в поиске окончательной теории мироздания.

Теория суперструн забрасывает широкий невод в океан мироздания. Это обширная и глубокая теория, охватывающая многие важнейшие положения, играющие центральную роль в современной физике. Она объединяет законы макромира и микромира, действие которых распространяется в самые дальние дали космического пространства и на мельчайшие частицы материи; поэтому рассказать об этой теории можно по-разному. Я выбрал подход, позволяющий проследить эволюцию наших представлений о пространстве и времени. Мне кажется, что такой подход, показывающий, как возникали и развивались новые, удивительные представления, является особенно увлекательным. Эйнштейн показал миру, что пространство и время могут вести себя совершенно необычным образом. В наши дни

исследования, ведущиеся на переднем крае науки, позволили применить открытия Эйнштейна к идее квантовой вселенной, имеющей многочисленные скрытые измерения. Эти измерения свернуты в крохотные петли, спрятанные в ткани мироздания, а их причудливая геометрия может содержать ответ на некоторые из самых глубоких вопросов, когда-либо ставившихся учеными. Хотя некоторые из новых понятий являются трудно уловимыми, мы увидим, что их суть можно понять с помощью вполне осязаемых аналогий. А будучи понятыми, эти идеи дадут совершенно иной, поразительный взгляд на нашу Вселенную.

На всем протяжении книги я старался оставаться как можно ближе к науке, пытаясь в то же время дать читателю – часто через аналогию и метафору – интуитивное понимание того, как ученые выработали современные представления о Вселенной. Хотя я старался избегать специальной терминологии и уравнений, радикально новый характер излагаемых понятий может побудить читателя иногда сделать паузу и обдумать ту или иную главу либо объяснение, чтобы дальнейший материал был ему понятен. Некоторые главы IV части (посвященные самым последним достижениям) являются несколько более абстрактными, чем остальная часть книги. Я позаботился о том, чтобы вовремя предупредить читателя об этом, и организовал текст так, чтобы такие главы могли быть прочитаны поверхностно или пропущены с минимальным ущербом для понимания материала, содержащегося в книге. Я включил в книгу словарь научных терминов, который позволит читателю быстро вспомнить идеи и понятия, введенные в основном тексте. Тот, кому эта книга попала в руки случайно, возможно захочет пропустить примечания, приведенные в конце; усердный читатель найдет в примечаниях более подробное описание вопросов, углубленное разъяснение идей, которые были упрощены в тексте книги, а также некоторые технические выкладки для тех, кто имеет достаточную математическую подготовку.

Я хотел бы выразить благодарность всем, кто оказал мне помощь в работе над книгой. Дэвид Стейнхардт с величайшим вниманием прочел рукопись и щедро одарил меня глубокими замечаниям и неоценимой поддержкой. Дэвид Моррисон, Кен Вайнберг, Рафаэль Каспер, Николас Болес, Стивен Карлип, Артур Гринспун, Дэвид Мермин, Майкл Попович и Шани Оффен внимательно ознакомились с рукописью и сделали массу подробных замечаний и предложений, которые позволили существенно улучшить книгу. Кроме того, вся рукопись или отдельные ее главы были прочитаны Полом Аспинуоллом, Персисом Дреллом, Майклом Даффом, Куртом Готтфридом, Джошуа Грини, Тедди Джефферсоном, Марком Камионковским, Яковом Кантером, Андрашем Ковачем, Дэвидом Ли, Меган Мак-Эвен, Нари Мистри, Хасаном Падамси, Роненом Плессером, Массимо Поратти, Фредом Шерри, Ларсом Стретером, Стивеном Строгачем, Эндрю Строминджером, Генри Ти, Кумруном Вафой и Габриэле Венециано, которые дали мне много полезных советов и поощрили меня к дальнейшей работе над книгой. Я хотел бы выразить особую благодарность Рафаэлю Ганнеру, помимо всего прочего, за его проницательную критику на ранних стадиях работы, которая помогла мне найти общую форму книги, а также Роберту Мэли за его ненавязчивое, но настойчивое побуждение перейти от слов к делу и начать писать книгу. Стивен Вайнберг и Сидни Коулмен дали мне ряд ценных советов и оказали немалую помощь в работе над книгой. Кэрол Арчер, Вики Карстенс, Дэвиду Касселю, Энн Койл, Майклу Дункану, Джейн Форман, Уэнди Грин, Сюзан Грин, Эрику Йендрессену, Гэри Касс, Шива Кумару, Роберту Мохинни, Пам Морхауз, Пьеру Рамону, Аманде Селз и Эйро Симончелли я обязан многочисленными, чрезвычайно полезными обсуждениями. Я в долгу перед Костасом Эфтимиу за его помощь в проверке фактов и поиске ссылок, а также в превращении моих первоначальных набросков в рисунки, на основе которых Том Рокуэлл создал – с терпением святого и художественным вкусом – иллюстрации к книге. Я также благодарен Эндрю Хэнсону и Джиму Сесна за их помощь в подготовке некоторых специальных рисунков.

Я благодарен Говарду Джорджи, Шелдону Глэшоу, Майклу Грину, Джону Шварцу, Джону Уилеру, Эдварду Виттену и, опять же, Эндрю Строминджеру, Кумруну Вафе и Габриэле Венециано за согласие ответить на вопросы и поделиться своими взглядами на различные темы, рассмотренные в книге.

Я счастлив выразить свою признательность Анжеле фон дер Липпе за ее проницательные замечания и ценные предложения, а также Трэйси Нэгл за ее исключительное внимание к деталям. Анжела и Трэйси были редакторами моей книги в издательстве W. W. Norton и немало способствовали значительному улучшению ясности изложения. Я также хотел бы поблагодарить моих литературных агентов, Джона Брокмана и Катинку Мэтсон, за квалифицированные рекомендации на всем протяжении работы над книгой, вплоть до ее выхода в свет.

Я хотел бы выразить самую искреннюю признательность за щедрую поддержку моих более чем пятнадцатилетних исследований в области теоретической физики Национальному научному фонду США, фонду Альфреда П. Слоана и Министерству энергетики США. Наверное, не удивительно, что мои собственные исследования посвящены воздействию, которое теория суперструн оказала на наши представления о пространстве и времени; в последующих главах я опишу некоторые из открытий, в которых мне посчастливилось принимать участие. Я надеюсь, что читатель получит удовольствие от чтения этих отчетов о собственной работе, хотя осознаю, что они могут создать преувеличенное впечатление о моей роли в разработке теории суперструн. Поэтому разрешите воспользоваться этой возможностью, чтобы выразить свою признательность более чем тысяче физиков по всему миру, отдающих свой труд и талант работе по созданию окончательной теории мироздания. Я приношу свои извинения тем, чьи работы я не назвал: это связано только с выбранной мной идеей построения книги и ограниченностью ее объема.

Наконец, я хочу выразить сердечную признательность Элен Арчер за ее бесконечную любовь и поддержку, без которой эта книга никогда не была бы написана.

Часть I. НА ПЕРЕДНЕМ КРАЮ ПОЗНАНИЯ

Глава 1. Связанные струной

Говорить о сознательном замалчивании было бы, конечно же, преувеличением. Однако более полувека – даже в разгар величайших в истории научных открытий – физики спокойно мирились с существованием темного облачка, клубящегося на далеком горизонте. А дело здесь вот в чем. Современная физика покоится на двух столпах. Один из них – это общая теория относительности Альберта Эйнштейна, которая дает теоретическую основу для понимания вселенной в ее наиболее крупных масштабах – звезд, галактик, скоплений галактик, и далее к необъятным просторам самой вселенной. Другой столп – это квантовая механика, дающая теоретическую базу для понимания вселенной в ее наименьших масштабах – молекул, атомов и далее вглубь субатомных частиц, таких как электроны и кварки. За годы исследований физики с невообразимой точностью экспериментально подтвердили практически все предсказания каждой из этих теорий. Но использование этих же теоретических средств с неизбежностью ведет еще к одному, обескураживающему выводу: в своей современной формулировке общая теория относительности и квантовая механика не могут быть справедливы одновременно. Эти две теории, обусловившие небывалый прогресс физики последнего столетия, который объяснил и расширение небес и основы строения материи, являются взаимно несовместимыми.

Если вам не приходилось ранее слышать об этом свирепом антагонизме, то вы, наверное, захотите узнать почему. Ответ не составляет большого секрета. За исключением наиболее экстремальных случаев, физики изучают либо объекты малые и легкие (как атомы и их составные части), либо объекты огромные и массивные (как звезды и галактики), но не те и другие одновременно. Это означает, что им достаточно было использовать либо только квантовую механику, либо общую теорию относительности, и они могли как бы невзначай отмахнуться от кричащего предостережения другой теории. На протяжении пятидесяти лет этот подход если и не подпадал под определение «блаженное неведение», то был весьма недалек от него.

Но Вселенная может быть экстремальной. В центрах черных дыр чудовищные массы сжимаются до микроскопических объемов. В момент Большого взрыва вся Вселенная была исторгнута из микроскопического ядра, по сравнению с которым песчинка весом в долю грамма выглядит исполином. Это примеры объектов, которые являются крошечными по размерам и, в то же время, невероятно массивными, и потому требуют одновременной наводки орудий как квантовой механики, так и общей теории отно-сительности. По причинам, которые будут становиться все более очевидными по мере продолжения нашего рассказа, при объединении уравнений общей теории относительности и квантовой механики начинается тряска, грохот и шипение пара, как в перегретом котле. Если выражаться менее образно, несчастливый союз этих двух теорий может приводить к появлению бессмысленных ответов на корректно поставленные физические вопросы. Даже если вы позволите глубинам черных дыр и началу Вселенной и далее скрываться под покровом тайны, вам не удастся избежать ощущения, что враждебность между квантовой механикой и общей теорией относительности вопиет о необходимости выработки более глубокого уровня понимания. Возможно ли, чтобы Вселенная была разделена на наиболее фундаментальном уровне, требуя одного набора законов для больших объектов и другого, несовместимого с первым, для малых?

Теория суперструн, зеленый новичок по сравнению с почтенными доктринами квантовой механики и общей теории относительности, отвечает на этот вопрос обнадеживающим «нет». Интенсивные исследования, проводившиеся в течение последнего десятилетия физиками и математиками всего мира, показали, что этот новый подход к описанию материи на ее наиболее фундаментальном уровне устраняет конфликт между общей теорией относительности и квантовой механикой. На самом деле теория суперструн дает больше. В этой новой системе общая теория относительности и квантовая механика необходимы друг другу для того, чтобы теоретические построения обрели смысл. Согласно теории суперструн, брачный союз законов макромира и микромира не только счастливый, но и неизбежный.

Но это только часть хороших новостей. Благодаря теории суперструн (или, для краткости, теории струн) этот союз делает гигантский шаг вперед. В течение трех десятилетий Эйнштейн был в поисках единой теории физики, которая должна была по его замыслу представлять собой единое теоретическое полотно, в ткань которого были бы вплетены все силы и взаимодействия природы и все составные элементы материи. Он потерпел неудачу. Сегодня, на заре нового тысячелетия, сторонники теории струн утверждают, что ускользающие нити этого единого полотна наконец-то найдены. Теория струн способна показать, что все удивительные события во Вселенной – от неистовой пляски субатомных кварков до величавых вальсов кружащихся двойных звезд, от изначального огненного шара Большого взрыва до величественных спиралей галактик – являются отражениями одного великого физического принципа, одного главного уравнения.

Поскольку эти особенности теории струн требуют радикального изменения наших представлений о пространстве, времени и материи, понадобится некоторое время, чтобы привыкнуть к новым понятиям, чтобы понимание их смысла достигло достаточного уровня. Однако, как станет ясно из дальнейшего, если взглянуть на теорию струн в надлежащем контексте, ее появление окажется поразительным, однако естественным результатом революционных открытий физики XX столетия. Мы увидим, что в действительности противоречие между общей теорией относительности и квантовой механикой было не первым, а третьим в последовательности поворотных конфликтов, с которыми столкнулась физика прошлого века. Разрешение каждого из этих конфликтов приводило к радикальному пересмотру нашего понимания Вселенной.

Три конфликта

Первый конфликт, отмеченный учеными еще в конце XIX в., связан с загадочными

свойствами распространения света. Коротко говоря, в соответствии с законами движения Исаака Ньютона, если бежать достаточно быстро, то можно догнать луч света, тогда как, согласно законам электромагнетизма Джеймса Клерка Максвелла, это сделать невозможно. Как будет показано в главе 2, Эйнштейн разрешил это противоречие в своей специальной теории относительности, полностью изменив при этом наше понимание пространства и времени. Согласно специальной теории относительности время и пространство не могут более рассматриваться как универсальные понятия, устано-аленные раз и навсегда и воспринимаемые всеми одинаково. Напротив, пространство и время, как следует из работ Эйнштейна, представляют собой податливые конструкции, форма и характеристики которых зависят от состояния движения наблюдателя.

Создание специальной теории относительности подготовило почву для второго конфликта. Одно из следствий работы Эйнштейна состоит в том, что никакой объект, никакое воздействие или возмущение не могут перемещаться со скоростью, превышающей скорость света. Но, как будет показано в главе 3, подтверждаемая экспериментально и привлекательная на интуитивном уровне универсальная теория гравитации Ньютона включает в себя взаимодействия, которые мгновенно распространяются на огромные расстояния в пространстве. И снова в разрешение конфликта включился Эйнштейн, предложивший в 1915 г. новую концепцию тяготения в своей общей теории относительности. Эта теория точно так же опрокинула существовавшие представления о гравитации, как раньше это сделала специальная теория относительности с понятиями пространства и времени. Пространство и время не только зависят от состояния движения наблюдателя, они также могут деформироваться и искривляться в ответ на присутствие вещества или энергии. Как мы увидим далее, такие деформации структуры пространства и времени передают силу тяжести из одного места в другое. Следовательно, пространство и время нельзя более рассматривать как статичные декорации, на фоне которых разворачиваются события во Вселенной. Напротив, как показала специальная, а затем и общая теория относительности, они принимают самое непосредственное участие в событиях.

Вслед за этим история повторилась еще раз. Создание общей теории относительности, разрешив одно противоречие, породило другое. Начиная с 1900 г., в течение трех десятилетий физики развивали квантовую механику (обсуждаемую в главе 4) для решения нескольких кричащих проблем, возникших при попытке применить понятия XIX в. к микромиру. Как было сказано выше, третье и наиболее глубокое противоречие возникло из несовместимости квантовой механики и общей теории относительности. В главе 5 будет показано, что гладкая искривленность пространства в общей теории относительности находится в противоречии с вытекающим из квантовой механики неистовым, вихревым поведением Вселенной на микроскопическом уровне. До середины 1980-х гг., когда теория струн разрешила этот конфликт, он справедливо считался центральной проблемой современной физики. Более того, теория струн, построенная на основе специальной и обшей теории относительности, требует нового серьезного пересмотра наших концепций пространства и времени. Например, большинство из нас считает само собой разумеющимся то, что наша Вселенная имеет три пространственных измерения. Однако, согласно теории струн, это неверно. Теория струн утверждает, что Вселенная имеет гораздо больше измерений, чем доступно нашему глазу, но дополнительные измерения туго скручены и спрятаны в складчатой структуре космического пространства. Эти замечательные гипотезы о структуре пространства и времени играют такую важную роль, что они станут лейтмотивом всего последующего изложения. Теория струн, по существу, отражает историю развития представлений о пространстве и времени в постэйнштейновскую эпоху.

Чтобы понять реальную ценность теории струн, необходимо отступить на шаг назад и кратко описать то, что мы узнали о микроскопической структуре Вселенной в течение XX столетия.

Вселенная в своем самом малом, или что мы знаем о материи

Древние греки предположили, что вещество Вселенной состоит из мельчайших «неделимых» частиц, которые они назвали атомами. Они высказали гипотезу, что точно так же, как в языках алфавитного типа огромное количество слов строится путем комбинации небольшого числа букв, так и огромное разнообразие материальных объектов может быть результатом комбинации небольшогочисла различных элементарных строительных блоков. Это было гениальным предвидением. Спустя более 2000 лет мы продолжаем считать его верным, хотя представления о сущности этих фундаментальных строительных блоков неоднократно подвергались пересмотру. В XIX в. ученые показали, что многие обычные вещества, например, кислород и углерод, состоят из мельчайших компонентов, которые, следуя традиции, идущей от греков, были названы атомами. Название сохранилось, но время показало, что оно было неправильным, поскольку атомы определенно являются «делимыми». К началу 1930-х гг. совместными усилиями Дж. Дж. Томсона, Эрнеста Резерфорда, Нильса Бора и Джеймса Чедвика была разработана известная большинству из нас модель строения атома, похожая на солнечную систему. Атомы, которые являются далеко не самыми элементарными частицами материи, состоят из ядра (содержащего протоны и нейтроны), окруженного роем движущихся по орбитам электронов.

В течение некоторого времени многие физики считали, что протоны, нейтроны и электроны являются «атомами» в том смысле, который вкладывали в это слово древние греки. Однако эксперименты, проведенные в 1968 г. на Стэнфордском линейном ускорителе и использовавшие возросшую мощь технологий для изучения глубин микромира, продемонстрировали, что ни протоны, ни нейтроны не являются фундаментальными. Эти эксперименты показали, что они состоят из трех частиц меньшего размера, названных кварками. Это вымышленное название было заимствовано теоретиком Мюрреем Гелл-Манном, предсказавшим существование кварков, из произведения ирландского писателя Джеймса Джойса Поминки по Финнегану. Экспериментаторы установили, что сами кварки делятся на два типа, которые несколько менее изысканно были названы и-кварками и d-кварками. Протон состоит из двух и-кварков и одного d-кварка, а нейтрон – из двух d-кварков и одного и-кварка.

Все, что мы видим на Земле и в небесах, по-видимому, состоит из комбинаций электронов, и-кварков и d-кварков. Не существует экспериментальных данных, указывающих на то, что какая-либо из этих трех частиц состоит из элементов меньшего размера. Однако имеется масса данных, свидетельствующих о том, что Вселенная содержит дополнительные компоненты. В середине 1950-х гг. Фредерик Райнес и Клайд Коуэн получили решающее экспериментальное доказательство существования четвертого типа фундаментальных частиц, названных нейтрино. Существование этих частиц было предсказано в начале 1930-х гг. Вольфгангом Паули. Нейтрино оказалось очень трудно обнаружить: это частица-призрак, которая чрезвычайно редко взаимодействует с другими видами материн. Нейтрино средней по величине энергии легко проникает сквозь многие триллионы миль свинца, которые не оказывают ни малейшего влияния на его движение. Эта информация должна принести вам значительное облегчение, поскольку прямо сейчас, когда вы читаете эту книгу, миллиарды нейтрино, испущенных Солнцем, проходят через ваше тело и через Землю в ходе долгих скитаний по космическому пространству. В конце 1930-х гг. физики, исследующие космические лучи (потоки частиц, которые бомбардируют Землю из космоса), открыли еще одну частицу, названную мюоном. Эта частица идентична электрону, за исключением того, что она примерно в 200 раз тяжелее. Поскольку в мироздании не было ничего – ни нерешенных загадок, ни пустующих ниш, – что требовало бы существования мюона, нобелевский лауреат, специалист по физике элементарных частиц Исидор Исаак Раби приветствовал открытие мюона не слишком радостной фразой: «Ну, и кто это заказывал?» Тем не менее, мюон существовал. За ним последовали многие другие частицы.

Используя все более мощную технику, физики продолжали сталкивать крошечные частицы материи все более высокой энергии. При этом в течение коротких промежутков

времени воссоздавались условия, не существовавшие со времен Большого взрыва. Среди образовавшихся осколков ученые искали новые фундаментальные частицы, чтобы добавить их к растущему списку элементарных частиц. Вот что они обнаружили: еще четыре кварка – c, s, b и t, еще одного, даже более тяжелого, родственника электрона, названного тау-лептоном, а также еше две частицы, свойства которых схожи со свойствами нейтрино (они получили название мюонного нейтрино и тау-нейтрино, чтобы отличить их от первого нейтрино, которое стало называться электронным нейтрино).

Таблица 1.1

Три семейства фундаментальных частиц и массы частиц (в долях массы протона). Значения масс нейтрино до сих пор не удалось определить экспериментально

Семейство 1

Электрон-0,00054

Электронное нейтрино-«10-8

и-кварк-0,0047

d-кварк-0,0074

Семейство 2

Мюон-0,11

Мюонное нейтрино-«0,0003

с-кварк-1,6

s-кварк-0,16

Семейство 3

Тау-1,9

Тау-нейтрино-«0,033

t-кварк-189,0

b-кварк-5,2

Эти частицы образуются в соударениях при высокой энергии, они существуют только в течение коротких промежутков времени и не входят в состав обычной материи. Но и это еще не конец истории. Каждая из этих частиц имеет соответствующую ей античастицу, обладающую такой же массой, но являющейся противоположной в некоторых других отношениях, например, противоположной по электрическому заряду (или зарядам других видов взаимодействий, обсуждаемых ниже). Например, античастица электрона называется позитроном, она имеет такую же массу, но ее электрический заряд (Подразумевается, что заряды частиц выражены в единицах элементарного заряда e = 1,6 • 10-19 Кл. – Прим. перев.) равен +1, тогда как у электрона он составляет – 1. При контакте вещество и антивещество взаимно уничтожаются, превращаясь в чистую энергию – вот почему антивещество, образовавшееся естественным образом, крайне редко встречается в окружающем нас мире.

Физики подметили закономерность в свойствах этих частиц (см. табл. 1.1). Частицы материи четко разделяются на три группы, которые часто называют семействами. Каждое семейство состоит из двух кварков, электрона или одного из его родственников, и одного из типов нейтрино. Свойства соответствующих частиц в трех семействах идентичны за исключением массы, которая последовательно увеличивается в каждом следующем семействе. В настоящее время физики исследуют структуру вещества в масштабах порядка одной миллиардной от одной миллиардной доли метра; при этом показано, что все вещество, найденное по сей день – естественное или полученное искусственно при помощи гигантских устройств для столкновения атомов – состоит из комбинаций частиц, входящих в эти семейства, и соответствующих им античастиц.

Взгляд на табл. 1.1, несомненно, вызовет у вас еще большее изумление, чем то, которое испытал Раби при открытии мюона. Разделение на семейства, по крайней мере, вносит какую-то видимость порядка, но при этом возникают многочисленные «почему». Почему требуется так много фундаментальных частиц, особенно если вспомнить, что для подавляющего большинства окружающих нас тел требуются только электроны, и-кварки и d-кварки? Почему семейств три? Почему не одно семейство, или не четыре, или не

какое-нибудь другое число? Почему наблюдается такой, на первый взгляд совершенно случайный, разброс значений масс частиц, например, почему масса тау-частицы в 3 520 раз больше массы электрона? Почему масса t-кварка в 40 200 раз больше массы и-кварка? Все эти числа выглядят странно, они кажутся случайными. Являются ли они игрой случая, связаны ли они с каким-то божественным выбором, или эти фундаментальные свойства нашей Вселенной имеют какое-то разумное научное объяснение?

Взаимодействия, или куда делся фотон

Картина только усложнится, если мы будем рассматривать существующие в природе взаимодействия. В окружающем нас мире полно самых различных способов оказания воздействий: бейсбольные биты бьют по мячам, энтузиасты банги (прыжков с привязанным к ногам канатом) бросаются вниз с вышек, магниты позволяют сверхскоростным поездам парить над металлическими рельсами, счетчики Гейгера издают щелчки в присутствии радиоактивных материалов, атомные бомбы могут взрываться. Мы можем воздействовать на тела, толкая, дергая или тряся их, бросая или стреляя в них другими телами; вытягивая, закручивая или сдавливая их, а также нагревая, охлаждая или поджигая. В течение последнего столетия физики накопили огромное количество доказательств того, что все эти взаимодействия между различными телами и материалами, а также миллионы миллионов других происходящих ежедневно взаимодействий могут быть сведены к сочетаниям четырех основных типов. Одним из них является гравитационное взаимодействие. Три других – это электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие наиболее привычно для нас – благодаря ему наша планета удерживается на орбите, вращаясь вокруг Солнца, а наши ноги твердо стоят на земле. Масса тела является мерой влияния, которое оказывают на него гравитационные силы, а также мерой гравитационных сил, создаваемых самим телом. Следующим хорошо известным видом взаимодействия являются электромагнитные силы. Этим силам мы обязаны комфортом современной жизни, они используются в электрическом освещении, компьютерах, телевидении, телефонах; кроме того, они лежат в основе устрашающей мощи грозы и нежного прикосновения человеческой руки. На микроскопическом уровне электрический заряд частиц играет ту же роль, что и масса для гравитационного взаимодействия: он определяет величину электромагнитного воздействия частицы и ее отклик на электромагнитное воздействие со стороны других частиц.

Сильное и слабое взаимодействия менее известны, поскольку их сила быстро убывает с расстоянием и играет существенную роль только на субатомном уровне – внутри ядер. В этом состоит причина того, что они были открыты совсем недавно. Сильное взаимодействие удерживает кварки в «склеенном» состоянии внутри протонов и нейтронов; оно же удерживает протоны и нейтроны плотно упакованными в атомном ядре. Наиболее известное проявление слабого взаимодействия связано с радиоактивным распадом таких веществ, как уран и кобальт.

В течение прошлого столетия физики обнаружили два общих для всех этих взаимодействий свойства. Во-первых, как будет рассмотрено в главе 5, на микроскопическом уровне каждому взаимодействию соответствует частица, которая может рассматриваться как наименьший сгусток этого взаимодействия. Когда лазер, «электромагнитное ружье», испускает пучок лучей, из него вылетает на самом деле поток фотонов, представляющих собой мельчайшие переносчики электромагнитного взаимодействия. Аналогично, наименьшими компонентами слабого и сильного взаимодействия являются частицы, известные под названием слабых калибровочных бозонов и глюонов. Название глюон (От английского glue – «клей, склеивать». – Прим. перев.) является особенно образным: глюоны могут рассматриваться как микроскопические компоненты прочного клея, удерживающего вместе составляющие атомное ядро частицы.) К 1984 г. экспериментаторы смогли подтвердить существование и детально изучить свойства приведенных в табл. 1.2 трех типов

частиц, отвечающих за различные виды взаимодействия.

Таблица 1.2

Четыре фундаментальных типа взаимодействий, существующих в природе; частицы, переносящие эти взаимодействия, и их массы (в единицах массы протона). (Переносчики слабого взаимодействия имеют различные массы, указанные в таблице. Теоретические исследования говорят о том, что масса гравитона

должна быть равна нулю)

Взаимодействие-Частица, переносящая взаимодействие-Масса

Сильное-Глюон-0

Электромагнитное-Фотон-0

Слабое-Слабые калибровочные бозоны-86,97

Гравитационное-Гравитон-0

Физики считают, что с гравитационным взаимодействием также связана частица – гравитон, однако ее существование пока не получило экспериментального подтверждения.

Вторая общая черта всех видов взаимодействия состоит в том, что точно так-же как для гравитационного взаимодействия степень влияния на тело определяется его массой, а для электромагнитного взаимодействия – зарядом, мера влияния сильного и слабого взаимодействий на все частицы определяется количеством «сильного заряда» и «слабого заряда». (Эти свойства приведены в таблице в примечаниях к данной главе1)).) Но, как и в случае с массами частиц, все, что смогли сделать физики – это тщательно измерить в эксперименте данные характеристики. Никто не предложил никакого объяснения, почему наша Вселенная состоит именно из этих частиц, и почему они имеют именно такие значения масс и зарядов.

Несмотря на наличие общих свойств, исследование фундаментальных взаимодействий привело только к появлению новых вопросов. Почему, например, существуют четыре фундаментальных взаимодействия? Почему не пять или три, или, может быть, одно? Почему эти взаимодействия имеют столь различные свойства? Почему сильное и слабое взаимодействия работают только в микроскопическом масштабе, тогда как гравитационные и электромагнитные силы имеют неограниченную область влияния? И с чем связано такое огромное различие в интенсивности этих взаимодействий?

Для того чтобы лучше понять последний вопрос, представьте себе, что у вас есть один электрон в левой руке и один – в правой. Попробуйте сблизить эти две частицы, имеющие одинаковый электрический заряд. Взаимное гравитационное притяжение будет способствовать их сближению, а электромагнитное отталкивание – препятствовать ему. Какое из этих взаимодействий одержит верх? Здесь все ясно: электромагнитное отталкивание примерно в миллион миллиардов миллиардов миллиардов миллиардов (1042) раз сильнее! Если представить, что размер вашего правого бицепса характеризует силу гравитационного взаимодействия, то ваш левый бицепс должен простираться за пределы известной части Вселенной, чтобы его размер мог дать сравнительное представление о силе электромагнитного взаимодействия. Единственная причина, по которой электромагнитные силы не доминируют полностью над гравитационными в окружающем нас мире, заключена в том, что большинство тел состоит из одинакового числа положительных и отрицательных частиц, и, в результате, создаваемые ими силы нейтрализуют друг друга. С другой стороны, гравитационные силы всегда являются силами притяжения, и для них не происходит нейтрализации – чем больше вещества, тем сильнее будет гравитационное взаимодействие. Однако, по существу, гравитационное взаимодействие является чрезвычайно слабым. (Этим объясняется трудность экспериментального подтверждения существования гравитона. Поиск наименьшего сгустка самого слабого из взаимодействий – очень трудная задача.) Эксперименты также показали, что сильное взаимодействие примерно в тысячу раз сильнее электромагнитного и в сто тысяч раз сильнее слабого взаимодействия. Но в чем же состоит причина того, что наша Вселенная имеет такие свойства?

Вопрос о том, почему те или иные характеристики имеют именно такие значения,

от-нюдь не является праздным; Вселенная была бы совсем иной, если бы свойства материи и частиц, отвечающих за фундаментальные взаимодействия, хотя бы чуть-чуть изменились. Например, существование стабильных ядер, образующих около сотни элементов периодической системы, очень сильно зависит от соотношения сильного и электромагнитного взаимодействия. Протоны, находящиеся в атомном ядре, отталкивают друг друга в результате действия электромагнитных сил. К счастью, сильное взаимодействие между составляющими эти протоны кварками преодолевает силы отталкивания и удерживает протоны вместе. Однако относительно небольшое изменение соотношения между величинами этих двух взаимодействий может легко нарушить равновесие и привести к разрушению большинства атомных ядер. Далее, если бы масса электрона была всего в несколько раз больше, электроны и протоны начали бы объединяться, образуя нейтроны и захватывая ядра водорода (простейшего элемента во Вселенной, с ядром, состоящим из одного протона), а это, в свою очередь, привело бы к нарушению баланса образования более сложных элементов. Существование звезд зависит от взаимодействий между стабильными ядрами; звезды не смогли бы образоваться при таком изменении фундаментальных физических законов. Величина гравитационных сил также играет важную роль. Огромная плотность вещества в центре звезды питает ядерный очаг и, тем самым, определяет интенсивность излучения звезды. Если величина гравитационных сил увеличится, давление в недрах звезд возрастет, что приведет к значительному росту интенсивности ядерных реакций. Но так же как яркое пламя исчерпывает горючее гораздо быстрее, чем тихое пламя свечи, так и увеличение скорости ядерных реакций привело бы к тому, что звезды, подобные нашему Солнцу, выгорели быстрее. Это оказало бы разрушительное влияние на зарождение жизни в том виде, в котором она нам известна. С другой стороны, если бы гравитационные силы существенно уменьшились, вещество не смогло бы собраться в скопления, не возникли бы звезды и галактики.

Мы могли бы продолжить, но основная идея ясна: Вселенная такая, какая она есть, потому, что вещество и частицы, отвечающие за фундаментальные взаимодействия, имеют те свойства, которые они имеют. Но существует ли научное объяснение тому, почему они имеют именно такие свойства?

Теория струн: основная идея

Теория струн представляет собой мощную парадигму понятий, которая впервые дает ответ на поставленные выше вопросы. Рассмотрим сначала основную идею этой теории.

Частицы, приведенные в табл. 1.1, являются «буквами» для всего вещества. Кажется, что, как и их лингвистические аналоги, частицы не имеют внутренней структуры. Теория струн говорит иное. Она утверждает, что если бы мы могли исследовать эти частицы с более высокой точностью, на много порядков превышающей наши современные технические возможности, мы обнаружили бы, что каждая из частиц является не точечным образованием, а состоит из крошечной одномерной *петли*. Внутри каждой частицы – вибрирующее, колеблющееся, пляшущее волокно, подобное бесконечно тонкой резиновой ленте, которое физики, не наделенные литературным вкусом Гелл-Манна, назвали *струной*. На рис. 1.1 мы продемонстрировали эту основную идею теории струн, взяв обычный материальный объект – яблоко – и последовательно увеличивая его структуру для того, чтобы показать ее компоненты во все более крупном масштабе. Теория струн добавляет новый микроскопический уровень – колеблющуюся петлю – к уже известной иерархии, идущей от атомов к протонам, нейтронам, электронам и кваркам2).

Рис. 1.1. Вещество состоит из атомов, которые в свою очередь состоят из кварков и электронов. Согласно теории струн все такие частицы в действительности представляют собой крошечные петли вибрирующих струн

Хотя это совершенно неочевидно, мы увидим в главе 6, что такая простая замена точечных элементарных компонентов материи струнами приводит к устранению противоречий между квантовой механикой и общей теорией относительности. Тем самым теория струн распутывает основной гордиев узел современной теоретической физики. Это выдающееся достижение, но оно представляет собой только часть причин, по которым теория струн вызывает такое восхищение.

Теория струн как единая теория всего

Во времена Эйнштейна сильное и слабое взаимодействия были еще неизвестны, однако его глубоко беспокоило существование даже двух различных взаимодействий – гравитационного и электромагнитного. Эйнштейн не мог примириться с тем, что природа устроена таким экстравагантным образом. Это стало побудительной причиной тридцатилетнего исследования, посвященного поиску так называемой единой теории поля, которая, как он надеялся, сможет продемонстрировать, что два взаимодействия представляют собой на самом деле проявления одного фундаментального принципа. Эти донкихотские поиски изолировали Эйнштейна от основного направления развития физики, которое, по вполне понятным причинам, было гораздо более озабочено разработкой новой дисциплины – квантовой механики. В начале 1940-х гг. он писал своему другу: «Я стал одиноким старым чудаком, который известен главным образом тем, что не носит носков, и которого выставляют как диковину по особым случаям»3'.

Эйнштейн просто опередил свое время. Прошло более полувека, и его мечта об универсальной теории стала Святым Граалем современной физики. При этом значительная часть сообщества физиков и математиков все больше верит в то, что теория струн может стать такой теорией. Основываясь на одном принципе – что на самом микроскопическом уровне все состоит из комбинаций вибрирующих волокон, – теория струн дает единый способ объяснения свойств всех взаимодействий и всех видов материи.

Например, теория струн говорит, что все наблюдаемые свойства элементарных частиц, приведенные в табл. 1.1 и 1.2, являются проявлением различных типов колебаний струн. Петли в теории струн имеют резонансные частоты, подобные резонансным частотам струн скрипки или пианино, на которых они предпочитают колебаться, и которые наше ухо воспринимает как музыкальные ноты и их более высокие гармоники. Но, как мы увидим далее, вместо того, чтобы звучать на определенной музыкальной ноте, каждая из разрешенных мод колебаний струны в теории струн проявляется в виде частицы, масса и заряды которой определяются конкретным видом колебания. Электрон представляет собой один вид колебания струны, и-кварк – другой, и так далее. Вместо набора разрозненных экспериментальных фактов свойства частиц в теории струн представляют собой проявления одного и того же физического свойства: резонансных мод колебаний – так сказать, музыки – фундаментальных петель струны. Та же идея применима и к взаимодействиям,

существующим в природе. Мы увидим, что частицы, переносящие взаимодействия, также связаны с определенными модами колебания струны, и, следовательно, все – вся материя и все взаимодействия – объединяются под одной и той же рубрикой колебаний микроскопических струн – «нот», на которых могут звучать струны.

Таким образом, впервые в истории физики у нас есть единая теория, которая может объяснить все фундаментальные особенности, лежащие в основе строения Вселенной. По этой причине теорию струн иногда описывают как возможного кандидата на роль «теории всего сущего» (ТВС), или«завершающей» или «окончательной» теории. Эти пышные эпитеты предназначены для того, чтобы отразить глубочайший возможный уровень физической теории, лежащей в основе всех остальных, теории, которая не требует и, более того, не допускает более глубокой основы для объяснения. На практике многие специалисты по теории струн используют более прагматический подход и трактуют ТВС в более узком смысле как теорию, которая может объяснить свойства фундаментальных частиц и сил, посредством которых эти частицы взаимодействуют между собой. Последовательный сторонник редукционизма (Редукционизм представляет собой философскую концепцию, согласно которой все высшие явления могут быть сведены к основополагающим низшим явлениям. В разные эпохи редукционизм принимал разные формы, например, в XVIII в. большую популярность имел механицизм, говоривший о возможности сведения всех явлений к механическим. – Прим. перев.) мог бы заметить, что это вовсе не является ограничением и что в принципе абсолютно все, начиная от Большого взрыва и заканчивая нашими мыслями, может быть описано с использованием лежащих в основе всего микроскопических физических процессов, в которых участвуют фундаментальные компоненты материи. Редукционисты говорят: если вы знаете все о компонентах, вы знаете все обо всем.

Философия редукционизма часто порождает ожесточенные дебаты. Многие находят ее ограниченной и отказываются согласиться с тем, что все тайны жизни и Вселенной являются простым отражением бесцельного танца микроскопических частиц, полностью управляемого законами физики. Действительно ли наши чувства радости, скорби и тоски всего лишь химические реакции между молекулами и атомами мозга, или, если обратиться к более глубокому уровню, между частицами, перечисленными в табл. 1.1, которые в действительности представляют собой всего лишь колеблющиеся струны? В ответ на эту критику нобелевский лауреат Стивен Вайнберг предостерегал в своей книге Мечты об окончательной теории: «На другом конце спектра находятся оппоненты редукционизма, которые пугают нас тем, что они называют бездушием современной науки. В какой бы степени они и их мир ни были сведены к частицам или полям и взаимодействию этих частиц и полей, они чувствуют себя униженными этим знанием… Я не буду пытаться ответить на эту критику, живописуя красоты современной науки. Мир, каким его видит редукционист, холоден и безлик. Мы должны принять его таким, каков он есть, не потому, что он нравится нам, но потому, что это способ существования мироздания»4).

Одни согласятся с такой суровой точкой зрения, другие будут спорить.

Многие пытаются возражать, утверждая, что новые достижения, такие как теория хаоса, говорят нам, что при увеличении сложности систем начинают действовать новые законы. Понимание поведения электрона – это одно, а использование этого знания для объяснения поведения торнадо – совсем другое. С этим большинство согласно. Мнения расходятся по вопросу о том, действительно ли разнообразные и часто неожиданные явления, которые происходят в более сложных, чем отдельные частицы, системах, связаны с работой новых физических принципов. Может быть принципы, определяющие поведение систем, имеют производный характер, который зависит, хотя и чудовищно сложным образом, от физических принципов, управляющих невообразимо большим числом элементарных компонентов? По моему мнению, эти принципы не представляют новых и независимых законов физики. Хотя объяснить свойства торнадо на языке физики электронов и кварков непросто, я вижу здесь чисто вычислительные проблемы, а не признак того, что

необходимы новые физические законы. Впрочем, опять же, найдутся те, кто не согласится с этим мнением.

Однако даже если кто-то и принимает спорную аргументацию убежденного редукциониста, принципы – это одно дело, а практика – совсем другое. Именно это бесспорное утверждение будет очень важным для нашего дальнейшего путешествия. Почти все согласятся, что создание ТВС никоим образом не означает, что задачи психологии, биологии, геологии, химии или даже физики будут решены или каким-то образом классифицированы. Вселенная – такое сказочно богатое и сложное место, что открытие окончательной теории, в том смысле, который мы описываем здесь, не означает конца науки. Как раз наоборот, открытие ТВС, окончательного объяснения Вселенной на ее самых малых масштабах, теории, которая не нуждается в каком-либо более глубоком объяснении, может дать наиболее прочное основание для строительства нашего понимания мира. Ее открытие будет означать начало, а не конец. Окончательная теория даст нам неколебимую точку опоры, навсегда гарантирующую познаваемость Вселенной.

Современное состояние теории струн

Центральной темой данной книги является объяснение устройства Вселенной на основе теории струн, при этом особое внимание уделено влиянию новых результатов на наше понимание пространства и времени. В отличие от многих других научных открытий, то, о чем говорится здесь, не является окончательно разработанной теорией, имеющей надежное экспериментальное подтверждение и полностью принятой научным сообществом. Как мы увидим в следующих главах, причина этого состоит в том, что теория струн является столь глубокой и сложной структурой, что даже несмотря на впечатляющий прогресс, достигнутый за два последних десятилетия, предстоит сделать еще очень много, прежде чем мы сможем заявить, что достигли полного понимания.

Таким образом, теория струн должна рассматриваться как развивающееся направление, первые результаты которого уже продемонстрировали поразительное проникновение в сущность пространства, времени и материи. Главным успехом является гармоничный союз общей теории относительности и квантовой механики. Далее, в отличие от всех предшествующих теорий, теория струн отвечает на основополагающие вопросы, относящиеся к наиболее фундаментальным составным частям и взаимодействиям в природе. Не менее важным, хотя это труднее передать, является замечательное изящество как ответов, которые дает теория, так и самой теоретической основы, позволяющей получать эти ответы. Например, в теории струн многие аспекты мироздания, которые могут показаться произвольными техническими деталями, такие, как число независимых фундаментальных частиц и их свойства, являются следствием неотъемлемых характеристик геометрии Вселенной. Если теория струн справедлива, микроскопическая структура нашей Вселенной представляет собой сложно переплетенный, многомерный лабиринт, в котором струны Вселенной бесконечно закручиваются и вибрируют, ритмично отбивая законы космоса. Свойства основных кирпичиков мироздания, – будучи совсем не случайными, – глубоко связаны со структурой пространства и времени.

В конечном счете, однако, ничто не может заменить четко определенных, поддающихся проверке предсказаний, которые смогут показать, действительно ли теория струн в состоянии поднять завесу тайны, скрывающую глубочайшие истины нашей Вселенной. Может пройти некоторое время, прежде чем наш уровень понимания достигнет глубины, достаточной для достижения этой цели, хотя, как будет показано в главе 9, экспериментальные проверки могут дать сильную и всестороннюю поддержку теории струн в течение ближайшего десятилетия. Более того, в главе 13 мы увидим, что теория струн недавно позволила решить одну из центральных проблем черных дыр, связанную с так называемой энтропией Бекенштейна– Хокинга, задачу, которая более двадцати пяти лет упорно сопротивлялась решению более традиционными методами. Этот успех убедил

многих в том, что теория струн дает глубочайшее понимание того, как устроена Вселенная.

Эдвард Виттен, один из первопроходцев и ведущих специалистов в теории струн, подытожил современную ситуацию, сказав, что «теория струн – это часть физики двадцать первого века, случайно попавшая в двадцатый век», повторив оценку, впервые высказанную выдающимся итальянским физиком Даниэлем Амати5'. В некотором смысле слу-чилось так, как если бы нашим предкам в конце XIX столетия преподнесли современный суперкомпьютер, но не дали руководства по его эксплуатации. Используя метод проб и ошибок, можно было бы оценить мощь суперкомпьютера, но для того, чтобы достичь подлинного мастерства, потребовались бы энергичные и продолжительные усилия. Признаки мощи компьютера, как проблески способности теории струн давать объяснения, могут быть причиной очень сильной мотивации к овладению всем устройством. Подобная мотивация сегодня подстегивает поколение физиков-теоретиков в стремлении добиться полного и точного аналитического понимания теории струн.

Замечание Виттена и схожие высказывания других специалистов в этой области указывают на то, что могут пройти десятилетия или даже столетия, прежде чем теория струн будет полностью разработана и осознана. Это вполне может оказаться правдой. В действительности математический аппарат теории струн столь сложен, что сегодня никто даже не знает точных уравнений этой теории. Вместо этого физики используют лишь приближенные варианты этих уравнений, и даже эти приближенные уравнения столь сложны, что пока поддаются только частичному решению. Тем не менее, вдохновляющие прорывы конца 1990-х гг., которые позволили дать теоретические ответы на вопросы невиданной доселе трудности, могут быть признаком того, что полное понимание теории струн на количественном уровне гораздо ближе, чем считалось первоначально. По всему миру физики разрабатывают новые мощные методы, далеко превосходящие использовавшиеся до сих пор многочисленные приближенные методы, коллективно собирая вместе разрозненные элементы головоломки теории струн с обнадеживающей скоростью.

Удивительно, но эти разработки дают новые средства для пересмотра некоторых основных положений теории, которые считались устоявшимися. Например, при взгляде на рис. 1.1 у вас может возникнуть законный вопрос: А почему струны? Почему не маленькие диски? Или микроскопические каплевидные ядрышки? Или какая-нибудь комбинация этих тел? Как мы увидим в главе 12, последние достижения показали, что перечисленные компоненты играют важную роль в теории струн, и что теория струн на самом деле является частью еще более грандиозного синтеза, который в настоящее время имеет (несколько мистическое) название М-теории. Эти последние достижения будут рассмотрены в заключительных главах данной книги.

Прогресс в науке осуществляется скачками. Одни периоды наполнены великими прорывами, в другие времена исследователи остаются без улова. Ученые получают новые теоретические и экспериментальные результаты. Они обсуждаются научным сообществом, иногда отвергаются, иногда модифицируются, а иногда служат отправной точкой для скачков в разработке новых и более точных методов понимания физического мира. Иными словами, наука движется в направлении того, что, как мы надеемся, будет окончательной истиной, по зигзагообразному пути, который начался с самых первых попыток человечества познать мироздание, и конец которого мы не можем предсказать. Нам неизвестно, является ли теория струн промежуточной остановкой на этом пути, или важным поворотным пунктом, или конечным пунктом назначения. Однако исследования, проводившиеся в течение последних двадцати лет сотнями физиков и математиков из многих стран, дали нам обоснованную надежду, что мы на правильном пути и, возможно, вышли на финишную прямую.

Эта книга представляет собой рассказ о теории струн, которая столь богата и ведет к таким далеко идущим выводам, что даже наш современный уровень понимания позволил получить поразительные новые результаты, касающиеся устройства нашей Вселенной. Основной темой в дальнейшем изложении будут те достижения, которые движут революцию

в понимании пространства и времени, начатую специальной и общей теорией относительности Эйнштейна. Мы увидим, что если теория струн верна, строение нашей Вселенной имеет такие свойства, которые, наверное, изумили бы даже Эйнштейна.

Часть II. ДИЛЕММА ПРОСТРАНСТВА, ВРЕМЕНИ И КВАНТОВ

Глава 2. Пространство, время и взгляд наблюдателя

В июне 1905 г. двадцатишестилетний Альберт Эйнштейн послал в немецкий журнал Annalen der Physik статью, в которой бросил вызов парадоксу о скорости света, который привлек его внимание десять лет назад, когда он был еще подростком. Перевернув последнюю страницу рукописи Эйнштейна, редактор журнала, Макс Планк, понял, что общепринятые научные представления низвергнуты. Без шума и фанфар скромный чиновник патентного бюро из швейцарского города Берна радикально изменил традиционные представления о пространстве и времени, заменив их новыми понятиями, бросившими вызов всему, к чему мы привыкли на основе нашего жизненного опыта.

Парадокс, который беспокоил Эйнштейна в течение десяти лет, состоял в следующем. В середине XIX в., после тщательного изучения результатов экспериментальных работ английского физика Майкла Фарадея, шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл сумел объединить понятия электричества и магнетизма в единую теорию электромагнитного поля. Если вам когда-либо приходилось находиться на вершине горы перед началом сильной грозы или стоять рядом с генератором Ван де Граафа, вы почувствовали, что такое электромагнитное поле, потому что вы его ощутили физически. Для тех, кто не имеет такого опыта, скажем, что поле похоже на поток электрических и магнитных силовых линий, пронизывающих область пространства. Например, если рассыпать железные опилки возле магнита, то можно увидеть, что они образуют упорядоченный рисунок, следующий невидимым силовым линиям магнитного поля. Сняв шерстяной свитер в особенно сухой день, вы слышите потрескивание, сопровождающееся одним-двумя короткими разрядами, что свидетельствует о существовании силовых линий электрического поля, порождаемых стекающими с волокон вашего свитера электрическими зарядами. Помимо объединения этих и всех других электрических и магнитных явлений в рамках единого математического описания, теория Максвелла довольно неожиданно привела к выводу, что электромагнитные возмущения распространяются с постоянной, никогда не изменяющейся скоростью, равной скорости света. На основании этого факта Максвелл заключил, что видимый свет представляет собой не что иное, как определенный тип электромагнитной волны. Как нам сегодня известно, взаимодействуя с химическими со-единениями в сетчатке глаза, эта волна дает человеку зрение. Более того (и это ключевой момент), теория Максвелла также показала, что все электромагнитные волны, в том числе и видимый свет, являются своего рода вечными странниками. Они никогда не останавливаются. Они никогда не замедляют своего движения. Свет всегда движется со скоростью света.

Все это хорошо и замечательно до тех пор, пока мы, вслед за шестнадцатилетним Эйнштейном, не зададимся вопросом: что произойдет, если пуститься в погоню за светом, двигаясь при этом со скоростью света? Интуиция, основанная на законах движения Ньютона, подсказывает, что мы догоним световые волны, и они будут казаться нам неподвижными, свет как бы остановится. Но согласно теории Максвелла и не вызывающим сомнений экспериментальным данным, такого явления, как неподвижный свет, попросту не существует – никому и никогда не удавалось держать на своей ладони неподвижный луч света. Отсюда и возникает парадокс. К счастью, Эйнштейн не знал о том, что многие ведущие физики мира сражались с этой задачей (часто следуя пути, ведущему в тупик), и обдумывал парадокс Максвелла и Ньютона без помех в уединении со своими собственными мыслями.

В этой главе мы расскажем, как Эйнштейн разрешил это противоречие в своей специальной теории относительности, навсегда изменив наши представления о пространстве и времени. Может показаться странным, что ключевым моментом в специальной теории относительности является точное понимание того, как выглядит мир для людей, часто называемых «наблюдателями», которые движутся по отношению друг к другу. На первый взгляд это может показаться просто схоластическим упражнением. Но оказалось, что это вовсе не так: благодаря Эйнштейну путешествие с воображаемыми наблюдателями, двигающимися за световым лучом, приводит к глубоким выводам, позволяющим понять, как необычно могут выглядеть самые заурядные ситуации для людей, находящихся в относительном движении.

Интуиция и ее изъяны

Повседневный опыт может подсказать несколько примеров, в которых восприятие ситуации такими наблюдателями различно. Например, деревья, растущие вдоль шоссе, будут выглядеть движущимися для водителя едущего автомобиля и неподвижными для путника, присевшего на обочине. Аналогично, приборная панель автомобиля не кажется движущейся для водителя (по крайней мере, мы надеемся на это), но, как и все другие части автомобиля, движется с точки зрения путника. Это настолько фундаментальные и интуитивно ощущаемые свойства окружающего нас мира, что мы редко обращаем на них внимание.

Специальная теория относительности утверждает, однако, что различия в картине, видимой двумя такими наблюдателями, являются более тонкими и глубокими. В ней высказывается странное утверждение, что наблюдатели, находящиеся в относительном движении, будут по-разному воспринимать расстояние и время. Это означает, как мы увидим ниже, что одинаковые наручные часы у двух наблюдателей, перемещающихся друг относительно друга, будут идти с разной скоростью и покажут разную длительность промежутка времени между двумя выбранными событиями. Специальная теория относительности показывает, что это утверждение не связано с точностью часов, а представляет собой неотъемлемое свойство самого времени.

Аналогично, если движущиеся по отношению друг к другу наблюдатели будут проводить измерения расстояния с помощью совершенно одинаковых рулеток, они получат разные значения длины. И снова дело здесь не в погрешностях средств измерения и не в ошибках при их использовании. Самые точные в мире измерительные устройства подтвердят, что пространство и время, измеряемые как расстояния и промежутки времени, воспринимаются разными наблюдателями по-разному. Специальная теория относительности в окончательной формулировке Эйнштейна разрешает противоречие между нашими интуитивными представлениями о движении и свойствами света. Од-нако это решение имеет свою цену – движущиеся относительно друг друг наблюдатели будут по-разному воспринимать пространство и время.

С тех пор, как Эйнштейн сообщил миру о своем поразительном открытии, прошло почти сто лет, однако до сих пор большинство из нас воспринимает пространство и время как абсолютные понятия. Мы не имеем интуитивного знания понятий специальной теории относительности, мы не чувствуем ее. Следствия специальной теории относительности не являются частью нашей интуиции. Причина этого весьма проста: эффекты, обусловленные специальной теорией относительности, зависят от скорости движения. При скоростях, с которыми движутся автомобили, самолеты и даже космические челноки, эти эффекты необычайно малы. Различия в восприятии пространства и времени между неподвижными наблюдателями и наблюдателями, едущими в машинах или летящими в самолетах, безусловно, существуют, но они столь малы, что остаются незамеченными. Однако если бы мы путешествовали в космическом корабле будущего, скорость которого составляет значительную часть скорости света, то эффекты, предсказываемые теорией относительности, были бы совершенно очевидны. Но, конечно, такая возможность пока еще остается в области

фантастики. Тем не менее, как мы увидим в последующих разделах, правильно поставленные эксперименты позволяют ясно и точно наблюдать релятивистские свойства пространства и времени, предсказываемые теорией Эйнштейна.

Для того чтобы получить представление о величине рассматриваемых эффектов, представим, что на дворе 1970 г., и в моде большие и быстрые автомобили. Слим, только что потративший все свои сбережения на приобретение нового «Понтиака», отправился вместе со своим братом Джимом на местный гоночный трек, чтобы устроить своей новой машине такой тест-драйв, который ему не позволил продавец. Разогрев машину, Слим устремился по гоночной полосе длиной в один километр со скоростью 200 км/ч, а Джим остался стоять на обочине, засекая время. Желая получить независимое подтверждение, Слим тоже пользуется секундомером, чтобы определить время, за которое машина пройдет полосу. До появления работы Эйнштейна никто не усомнился бы в том, что если секундомеры Слима и Джима работают правильно, они покажут одинаковое время. Однако согласно специальной теории относительности, секундомер Джима покажет 18 с, а секундомер Слима – 17,99999999999969 с – на крошечную долю секунды меньше. Конечно, эта разница настолько мала, что она может быть обнаружена только при измерениях, точность которых во много раз превосходит точность ручных секундомеров, которые запускаются и останавливаются нажатием пальца, точность систем хронометража, используемых на олимпийских играх, и даже точность прецизионных атомных часов самой современной конструкции. Поэтому неудивительно, что наш повседневный опыт не обнаруживает того, что течение времени зависит от того, с какой скоростью мы движемся.

Похожие различия обнаружатся и при измерении длины. Допустим, что в ходе следующего испытания Джим решил использовать хитрый трюк для измерения длины новой машины Слима: он запускает секундомер, когда мимо него проходит передняя часть автомобиля, и останавливает его, как только рядом с ним оказывается задняя часть машины. Поскольку Джим знает, что автомобиль Слима движется со скоростью 200 км/ч, он может рассчитать его длину, умножив скорость на время, зафиксированное его секундомером. И вновь, до появления теории Эйнштейна, ни у кого не возникли бы сомнения, что длина, которую таким косвенным способом определил Джим, в точности совпадет с длиной, которую тщательно вымерил Слим, когда его машина стояла без движения на полу автомобильного салона. Специальная теория относительности, напротив, утверждает, что если Слим и Джим выполнили измерения точно, и Слим установил, что длина его машины составляет, скажем, ровно 5 м, то измерения Джима дадут цифру 4,999999999999914 м – на крошечную долю метра меньше. Как и в случае измерения времени, это различие настолькомало, что обычные инструменты не в состоянии обнаружить его.

Хотя эти различия чрезвычайно малы, они указывают на фатальный изъян в общепринятой концепции универсального и неизменного пространства и времени. По мере того как относительная скорость наблюдателей, таких как Слим и Джим, увеличивается, этот изъян становится все более очевидным. Чтобы различия стали заметными, скорость движения должна составлять существенную долю от максимально возможной скорости – скорости света, которая, согласно теории Максвелла и результатам экспериментальных измерений, составляет примерно 300000 км/с или около 1,08 млрд км/ч. Такой скорости достаточно, чтобы обогнуть земной шар более семи раз в течение одной секунды. Например, если Слим будет двигаться со скоростью не 200 км/ч, а 935 млн км/ч (около 87 % от скорости света), то, как показывают расчеты с использованием математического аппарата специальной теории относительности, длина его машины, измеренная Джимом, составит примерно 2,5 м. Это существенно отличается от результата, полученного Слимом (а также от цифры, приведенной в техническом руководстве к автомобилю). Аналогично, время, за которое автомобиль пройдет гоночную полосу по данным Джима, будет примерно в два раза больше, чем время, измеренное Слимом.

Поскольку такие огромные скорости находятся далеко за пределами технически достижимых, эффекты «замедления времени» и «лоренцевского сокращения», как они

называются в специальной литературе, в нашей повседневной жизни чрезвычайно малы. Если бы мы жили в мире, в котором тела обычно двигаются со скоростями, близкими к скорости света, эти свойства пространства и времени были бы настолько понятны нам интуитивно (поскольку мы сталкивались бы с ними постоянно), что заслуживали бы отдельного упоминания не больше, чем рассмотренное в начале этой главы кажущееся движение деревьев на обочине дороги. Но поскольку мы живем в ином мире, эти особенности нам непривычны. Как будет видно ниже, понимание и принятие их требует, чтобы мы подвергли наш взгляд на мир значительным изменениям.

Принцип относительности

В основе специальной теории относительности лежат два простых свойства, имеющих, однако, глубокие корни. Одно из них, как уже упоминалось, касается света; мы будем обсуждать его более подробно в следующем разделе. Другое является более абстрактным. Оно связано не с каким-либо конкретным физическим законом, а относится ко всем законам физики. Это принцип относительности, который базируется на простом факте: всегда, когда речь идет об абсолютной величине или о векторе скорости (величине скорости тела и направлении движения тела), следует точно указать, кто или что выполняет измерения. Важность этого утверждения легко понять на примере следующей ситуации. Представим себе, что Джордж, одетый в космический скафандр с прикрепленной к нему красной сигнальной лампочкой, парит в абсолютной темноте абсолютно пустого космического пространства, вдали от всех планет, звезд и галактик. С точки зрения Джорджа, он находится в полной неподвижности, в однородном безмолвном мраке Вселенной. Вдалеке Джордж замечает слабенький мерцающий зеленый огонек, который постепенно приближается к нему. В "конце концов он приближается так близко, что Джордж видит лампочку, прикрепленную к скафандру другого космонавта, Грейс, которая медленно проплывает мимо него. Пролетая мимо, она машет ему рукой, Джордж отвечает тем же, и она медленно удаляется. С той же достоверностью история могла быть рассказана и Грейс. Начало рассказа будет таким же: Грейс в полном одиночестве, в необъятном безмолвном пространстве. Вдали Грейс замечает мерцающий красный огонек, который постепенно приближается к ней. Наконец огонек подходит достаточно близко, чтобы Грейс могла увидеть, что это лампочка, прикрепленная к скафандру другого космонавта, Джорджа. Он медленно проплывает мимо и, поравнявшись с ней, машет ей рукой. Грейс отвечает, и он растворяется во мраке.Эти две истории описывают одну и ту же ситуацию с двух различных, но равноправных точек зрения. Каждый наблюдатель считал себя неподвижным и воспринимал другого как движущегося. Обе эти точки зрения понятны и оправданы. Поскольку между двумя космонавтами существует симметрия, с фундаментальных позиций нет оснований утверждать, что один из них «прав», а другой «неправ». У каждого одинаковые основания считать себя правым.

Этот пример демонстрирует сущность принципа относительности, которая состоит в том, что понятие движения относительно. Мы можем говорить о движении тела только по отношению к какому-то другому телу. Таким образом, утверждение «Джордж движется со скоростью 10 км/ч» не будет иметь смысла до тех пор, пока мы не укажем тело для сравнения. Утверждение «Джордж движется со скоростью 10 км/ч относительно Грейс» имеет смысл, поскольку теперь мы указали Грейс в качестве точки отсчета. Как показывает наш пример, это последнее утверждение эквивалентно утверждению «Грейс движется со скоростью 10 км/ч относительно Джорджа (в противоположном направлении)». Другими словами, не существует понятия «абсолютного» движения. Движение относительно.

Ключевым моментом в этой истории является то, что ни Джорджа, ни Грейс не толкали, не тянули, не прилагали к ним сил и не оказывали на них какого-либо другого воздействия, которое могло бы нарушить безмятежное состояние свободного равномерного движения, в котором они пребывали. Таким образом, более точная формулировка говорит, что свободное движение имеет смысл только относительно других объектов. Это важное

уточнение, поскольку если действуют силы, они могут изменить скорость наблюдателей – величину скорости и/или направления движения, и эти изменения могут быть зафиксированы. Например, если бы за спиной Джорджа был реактивный ранцевый двигатель, Джордж наверняка бы почувствовал, что он движется. Это чувство является внутренним. Если бы ранцевый двигатель работал, Джордж бы знал, что он движется, даже если бы его глаза были закрыты, и он не мог проводить сравнение с другими объектами. Даже без этих сравнений он не мог бы уже утверждать, что был неподвижен, а «остальной мир двигался мимо него». Движение с постоянной скоростью относительно, а движение с непостоянной скоростью, или, иными словами, с ускорением – нет. (Мы вернемся к этому вопросу в следующей главе, когда будем обсуждать ускорение и общую теорию относительности Эйнштейна.)

Помещение этих событий во мрак пустого космического пространства облегчает понимание за счет отсутствия таких привычных объектов, как улицы и здания, которым мы обычно, хотя и не совсем оправданно, присваиваем статус «неподвижных». Однако тот же принцип применим и к земным условиям: с ним приходится сталкиваться и в повседневной жизни1'. Представим, например, что уснув в поезде, вы проснулись как раз в тот момент, когда мимо по параллельному пути проходит другой поезд. Вид из окна полностью закрыт этим поездом, который не дает вам видеть другие объекты, и в течение какого-то времени вы не будете знать, кто движется – ваш поезд, другой или оба сразу. Конечно, если ваш поезд покачивается или постукивает на стыках рельсов, или если он меняет направление движения на повороте пути, вы почувствуете, что движетесь. Но если движение будет плавным, если скорость поезда будет оставаться постоянной, вы будете наблюдать только относительное движение двух поездов, и не сможете утверждать наверняка, который из них движется.

Сделаем еще один шаг. Представим, что вы едете в таком поезде, и опустили шторы, так что окна теперь полностью закрыты. При отсутствии возможности видеть что-либо за пределами купе и при абсолютно постоянной скорости движения поезда у вас не будет никакой возможности определить, движетесь вы или нет. Купе вокруг вас выглядит совершенно одинаково независимо от того, стоит ли поезд или мчится с большой скоростью. Эйнштейн формализовал эту идею, которая на самом деле восходит еще к Галилею, провозгласив, что ни вы, и никакой другой путешественник, не сможете провести в закрытом купе эксперимент, который позво-лил бы определить, движется поезд или нет. Здесь опять работает принцип относительности, поскольку любое свободное движение относительно, оно приобретает смысл только при сравнении с другими объектами или наблюдателями, которые также совершают свободное движение. У вас нет возможности определить состояние вашего движения без прямого или косвенного сравнения с каким-либо «внешним» телом. Понятия «абсолютного» равномерного движения попросту не существует, такое движение приобретает физический смысл только при сравнении.

В действительности Эйнштейн понял, что принцип относительности означает большее: законы физики, каковы бы они ни были, должны быть абсолютно одинаковы для всех наблюдателей, совершающих равномерное движение. Если бы Джордж и Грейс не просто парили в одиночестве в пространстве, а проводили бы одинаковые серии экспериментов на своих космических станциях, результаты, полученные ими, были бы одинаковы. Напомним еще раз, что каждый из них абсолютно убежден, что его или ее станция находится в покое, хотя станции и совершают относительное движение. Если все используемое ими оборудование одинаково, и нет никаких различий в условиях экспериментов, они будут в полностью симметричных условиях. Аналогично, законы физики, которые каждый из них будет выводить из результатов экспериментов, также будут идентичны. Ни сами наблюдатели, ни проводимые ими эксперименты не будут подвержены никакому влиянию, т. е. никоим образом не будут зависеть от равномерного движения. Именно эта простая концепция устанавливает полную симметрию между такими наблюдателями и составляет содержание принципа относительности. Вскоре мы используем всю мощь этого принципа.

Скорость света

Второй ключевой компонент специальной теории относительности связан со светом и свойствами его распространения. Только что мы говорили, что утверждение «Джордж движется со скоростью 10 км/ч» не имеет смысла без указания ориентира для сравнения. Однако в результате почти столетних усилий ряда выдающихся физиков-экспериментаторов было показано: все наблюдатели согласятся с тем, что свет движется со скоростью 300000 км/с, независимо от ориентира для отсчета.

Этот факт потребовал революционных изменений наших взглядов на Вселенную. Попробуем сначала понять его смысл, сопоставляя со сходными утверждениями применительно к более обычным объектам. Представим, что стоит прекрасный солнечный денек, и вы вышли на улицу поиграть в мяч с подругой. В течение какого-то времени вы оба лениво бросали мяч друг другу со скоростью, скажем, 6 м/с. Вдруг налетает неожиданная гроза, и вы оба бежите от нее в поисках укрытия. После того, как гроза прошла, вы решаете вернуться к игре в мяч, но вдруг замечаете, что что-то изменилось. Волосы вашей подружки встали дыбом и торчат в разные стороны, глаза округлились и стали безумными. Взглянув на ее руку, вы со страхом видите, что она больше не хочет играть в мяч, а вместо этого собирается запустить в вас ручной гранатой. Понятно, что ваш энтузиазм по поводу игры в мяч резко идет на убыль, вы поворачиваетесь и бежите. Когда ваша партнерша бросает гранату, она летит в вашу сторону, но поскольку вы бежите, скорость, с которой она приближается к вам, будет меньше 6 м/с. Исходя из повседневного опыта, можно утверждать, что вы можете бежать со скоростью, скажем, 3,6 м/с, и тогда ручная граната будет приближаться к вам со скоростью 6 – 3,6 = 2,4 м/с. Еще один пример. Если вы находитесь в горах, и на вас с грохотом мчится снежная лавина, вы стремитесь повернуться и броситься бежать, поскольку это уменьшит скорость, с которой снег приближается к вам, и даст хоть какую-то надежду на спасение. Как и раньше, для неподвижного наблюдателя скорость приближения лавины будет больше, чем с точки зрения наблюдателя, спасающегося бегством.

Ну а теперь сравним все наши наивные наблюдения за мячами, гранатами и снежными лавинами с фактами, относящимися к свету. Чтобы облегчить сравнение, будемрассматривать луч света как совокупность крошечных «сгустков» или «комочков», известных под названием фотонов (более подробно свойства света будут обсуждаться в главе 4). Когда мы включаем сигнальные огни или испускаем лазерный луч, мы, на самом деле, выстреливаем пучок фотонов в ту сторону, в которую направлено устройство. Как и в случае с гранатами и лавинами, давайте рассмотрим, как движение фотона выглядит для наблюдателя, который находится в движении. Предположим, что ваша потерявшая рассудок подруга вместо гранаты взяла в руки мощный лазер. Если она стреляет из лазера в вашу сторону, а у вас есть под рукой подходящее измерительное устройство, вы можете обнаружить, что скорость приближения фотонов пучка составляет 300 000 км/с. А что произойдет, если вы станете убегать, как вы поступили, столкнувшись с перспективой поиграть с ручной гранатой? Какое значение скорости вы получите для приближающихся фотонов? Для большей внушительности, предположим, что в вашем распоряжении звездный корабль «Энтерпрайз», и вы удираете от своей подружки со скоростью, скажем, 50 000 км/с. Следуя логике традиционного ньютоновского подхода, поскольку вы убегаете, измеренная вами скорость приближающихся фотонов окажется меньше. Соответственно, вы можете рассчитывать, что они приближаются к вам со скоростью, равной 300 000 – 50 000 = 250 000 км/с.

Растущее количество различных экспериментальных данных, первые из которых относятся еще к 1880-м гг., а также тщательный анализ и интерпретация максвелловской электромагнитной теории света, постепенно убедили научное сообщество, что на самом деле вы получите другой результат. Даже несмотря на то, что вы убегаете, результат вашего измерения скорости приближающихся фотонов все равно составит 300000 км/с и ни на йоту

меньше. На первый взгляд это выглядит очень забавно и совершенно не согласуется с тем, что происходило, когда вы убегали от приближающегося мяча, гранаты или лавины, однако скорость приближающихся фотонов всегда будет составлять 300 000 км/с. Движетесь ли вы навстречу приближающимся фотонам или преследуете удаляющиеся, не имеет значения: скорость их приближения или удаления будет оставаться совершенно неизменной, и вы всегда получите значение 300000 км/с. Независимо от относительного движения между источником фотонов и наблюдателем, скорость света всегда будет одной и той же2).

Технологические ограничения таковы, что описанные выше «эксперименты» со светом не могут быть проведены. Однако были проведены другие, сопоставимые эксперименты. Например, в 1913 г. голландский физик Биллем де Ситтер предположил, что для измерения влияния движения источника на скорость света могут использоваться движущиеся с большой скоростью двойные звезды (две звезды, которые вращаются одна вокруг другой). Результаты многочисленных экспериментов такого рода, выполненных за последние восемьдесят лет, продемонстрировали, с впечатляющей точностью, что скорость света от движущейся звезды равна скорости света, испускаемого неподвижной звездой, т.е. 300 000 км/с. Более того, в течение прошлого столетия было проведено большое число других, весьма тщательных экспериментов, в ходе которых скорость света измерялась прямо и косвенно в самых разных условиях. Были проверены также различные следствия постоянства скорости света, и все эти данные подтвердили неизменность скорости света.

Если вам покажется, что это свойство света трудно усвоить, вы можете утешаться тем, что вы не одиноки. В начале XX в. физики потратили немало усилий на то, чтобы опровергнуть его. Они не смогли этого сделать. Эйнштейн, напротив, приветствовал постоянство скорости света, поскольку оно позволяло разрешить противоречие, которое беспокоило его с тех пор, когда он был подростком: независимо от того, с какой скоростью вы движетесь за лучом света, он по-прежнему будет удаляться от вас со скоростью света. Вы не можете сделать воспринимаемую скорость, с которой движется свет, ни на йоту меньше чем 300 000 км/с, не говоря уж о том, чтобы свет казался покоящимся. Вердикт окончательный, обжалованию не подлежит. Но триумфальное разрешениепарадокса скорости света было не просто маленькой победой. Эйнштейн понял, что постоянство скорости света означает ниспровержение всей ньютоновской физики.

Истина и ее последствия

Скорость является мерой того, на какое расстояние может переместиться объект в течение заданного промежутка времени. Если мы едем в автомобиле, двигающемся со скоростью 100 км/ч, это означает, конечно, что мы проедем 100 км, если сможем поддерживать эту скорость в течение часа. В такой формулировке скорость выглядит довольно тривиальным понятием, и вы можете удивиться, зачем поднимать столько шума по поводу скорости мячей, снежных лавин и фотонов. Однако, обратим внимание на то, что расстояние представляет собой характеристику пространства; в частности, оно представляет собой меру того, сколько пространства расположено между двумя точками. Заметим также, что длительность представляет собой характеристику времени, а именно, промежутка времени между двумя событиями. Следовательно, скорость связывает понятия пространства и времени. Рассуждая таким образом, мы видим, что любой факт, который бросает вызов обычным представлениям о скорости, например, постоянство скорости света, может привести к пересмотру общих представлений о пространстве и времени. Именно поэтому странный факт, касающийся скорости света, заслуживает тщательного исследования. Внимательное изучение привело Эйнштейна к удивительным выводам.

Влияние на время. Часть I

Используя постоянство скорости света, можно с минимальными усилиями показать,

что привычная обыденная концепция времени неверна. Представим себе лидеров двух воюющих держав, сидящих на противоположных концах длинного стола переговоров, которые только что пришли к согласию о прекращении огня, но ни один из них не хочет подписывать это соглашение раньше другого. Генеральный секретарь ООН находит блестящее решение. Ровно посередине между двумя президентами помещается электрическая лампа, которая сначала выключена. Когда лампа включается, свет, который она излучает, достигает каждого из президентов одновременно, поскольку они находятся на одинаковом расстоянии от лампы. Каждый из президентов согласен подписать свою копию договора, когда он (или она) увидит свет. Этот план претворяется в жизнь, и соглашение подписывается к взаимному удовлетворению обеих сторон.

Вдохновленный успехом, Генеральный секретарь использует тот же самый подход к двум другим воющим нациям, которые также достигли мирного соглашения. Единственное различие состоит в том, что эти президенты ведут переговоры, сидя на противоположных концах стола, который находится в вагоне поезда, движущегося с постоянной скоростью. Конкретно, лицо президента Форляндии обращено в сторону движения поезда, а лицо президента Бэкляндии – в обратную сторону. Знакомый с тем, что законы физики остаются неизменными и не зависят от состояния движения до тех пор, пока движение остается равномерным, генеральный секретарь игнорирует это различие и проводит церемонию подписания по сигналу электрической лампы точно так же, как и в предыдущем случае. Оба президента подписывают соглашение и празднуют конец вражды в кругу своих советников.

Как раз в этот момент приходит известие, что между представителями обеих стран, наблюдавших за церемонией с платформы, мимо которой проходил поезд, опять начались столкновения. Пассажиры поезда, в котором проходили переговоры, потрясены, услышав, что причина вновь вспыхнувшей вражды, по словам жителей Форляндии, состоит в том, что их одурачили: их президент подписал договор раньше президента Бэкляндии. Но если все, кто присутствовал в поезде, были единодушны в том, что договор был подписан одновременно, как могло случиться, что наблюдатели, расположенные снаружи, видели это иначе?

Давайте рассмотрим более подробно, как все это выглядело с точки зрения наблюдателя, расположенного на платформе. Сначалалампа в поезде выключена, затем в какой-то момент времени она включается, посылая лучи света в сторону обоих президентов. С точки зрения наблюдателя на платформе президент Форляндии движется навстречу свету, а президент Бэкляндии – удаляется от света. Это значит, что для наблюдателя на платформе свет должен пройти меньший путь, чтобы достичь президента Форляндии, который движется в сторону приближающегося света, чем до президента Бэкляндии, который удаляется от света. Это высказывание не касается скорости света, распространяющегося в сторону двух президентов – мы уже отмечали, что независимо от состояния движения источника и наблюдателя, скорость света всегда остается одной и той же. Мы говорим только о том, какое расстояние, с точки зрения наблюдателя на платформе, должен пройти свет от вспышки лампы, прежде чем он достигнет каждого из президентов. Поскольку для президента Форляндии это расстояние меньше, чем для президента Бэкляндии, а скорость света одна и та же при движении в обоих направлениях, свет достигнет президента Форляндии раньше. Вот почему граждане Форляндии сочли себя обманутыми.

Слушая рассказы свидетелей, которые передает служба новостей CNN, Генеральный секретарь, оба президента и все их советники не могут поверить своим ушам. Они все согласны в том, что лампа была надежно закреплена ровно посередине расстояния между двумя президентами и, следовательно, свет, который излучала лампа, прошел одинаковое расстояние до каждого из президентов. Поскольку скорость света, излученного вправо и влево, одинакова, они считают, и сами наблюдали это, что свет достиг каждого из президентов одновременно.

Кто же прав, те, кто ехал в поезде, или те, кто стоял на платформе? Наблюдения каждой группы и их аргументы безупречны. Правы и те, и другие. Как и в случае с двумя

обитателями космического пространства, Джорджем и Грейс, каждая точка зрения одинаково истинна. Только вот эти две истины противоречат друг другу. Между тем на кону важный политический вопрос: действительно ли оба президента подписали соглашение одновременно? Наблюдения и аргументы, изложенные выше, с неизбежностью ведут нас к выводу, что с точки зрения тех, кто находимся в поезде, договор был подписан одновременно, а с точки зрения тех, кто стоял на платформе – не одновременно. Иными словами, события, которые являются одновременными с точки зрения одних наблюдателей, могут быть неодновременными с точки зрения других, если эти две группы наблюдателей движутся по отношению друг к другу.

Это удивительный вывод. Он представляет собой одно из самых глубоких проникновений в сущность нашего мира, когда-либо сделанных человеком. Если спустя долгое время после того, как вы закончите читать эту книгу, из всей этой главы вы сможете вспомнить только несчастливую попытку разрядки международных отношений, это будет означать, что вы уловили суть открытия Эйнштейна. Это совершенно неожиданное свойство времени было установлено без использования математического аппарата, доступного лишь избранным, без запутанных цепочек логических выводов – только на основе факта постоянства скорости света. Заметьте, что если бы скорость света не была постоянной, а вела себя в соответствии с нашими интуитивными представлениями, основанными на медленном движении мячей и снежков, стоявшие на платформе наблюдатели согласились бы с теми, кто был в поезде. Наблюдатель с платформы продолжал бы считать, что фотоны должны пройти большее расстояние до президента Бэкляндии, чем до президента Форляндии. Однако обычная интуиция подсказывает, что в сторону президента Бэкляндии свет будет двигаться быстрее, получив дополнительный «толчок» от поезда, двигающегося вперед. Аналогичным образом, эти наблюдатели могли полагать, что свет, приближающийся к президенту Бэкляндии, будет двигаться медленнее, поскольку он увлекается назад движением поезда. Если учесть эти (ошибочные) доводы, наблюдатели на платформе увидели бы, что лучи света достигнут каждого президента одновременно. Однако в реальном мире свет не увеличивает и не уменьшает своей скорости, его нельзяподтолкнуть или затормозить. Следовательно, наблюдатели на платформе будут правы, утверждая, что сначала свет дошел до президента Форляндии.

Постоянство скорости света требует, чтобы мы отказались от устаревшего представления о том, что одновременность является универсальным понятием, которое воспринимается всеми одинаково, независимо от состояния движения. Не существует универсальных часов, которые, как считалось раньше, бесстрастно отсчитывают одинаковые секунды здесь, на Земле, на Марсе, на Юпитере, в туманности Андромеды и в любом другом закоулке Вселенной. Напротив, наблюдатели, движущиеся относительно друг друга, будут иметь различное мнение по вопросу об одновременности событий. Как говорилось выше, эта неотъемлемая характеристика мира, в котором мы живем, является столь непривычной потому, что связанные с ней эффекты чрезвычайно малы при скоростях, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Если бы стол для ведения переговоров имел длину 30 метров, а поезд двигался со скоростью 16 км/ч, наблюдатели на платформе могли бы «увидеть», что свет достиг президента Форляндии на одну миллионную одной миллиардной доли секунды раньше, чем он дошел до президента Бэкляндии. Это различие действительно существует, но оно столь мало, что не может быть обнаружено непосредственно с помощью человеческих чувств. Если бы поезд двигался гораздо быстрее, скажем, со скоростью 270 000 км/с, то с точки зрения наблюдателя, находящегося на платформе, свет дошел бы до президента Бэкляндии за время, в 20 раз большее, чем до президента Форляндии. При высоких скоростях поразительные эффекты специальной теории относительности становятся все более заметными.

Влияние на время. Часть II

Дать абстрактное определение времени трудно – попытки сделать это часто кончаются отсылкой на само слово «время» или приводят к запутанным лингвистическим конструкциям, цель которых состоит в том, чтобы избежать употребления этого слова. Вместо того чтобы идти этим путем, можно принять прагматическую точку зрения и определить время как то, что измеряется с помощью часов. Конечно, это переносит бремя определения на слово «часы»; мы можем довольно нестрого определить часы как устройство, которое совершает идеально регулярные циклы движения. В этом случае можно измерять промежутки времени, подсчитывая число циклов, выполненных нашими часами. Обычные часы, например, наручные часы, удовлетворяют этому определению – в них имеются стрелки, совершающие равномерные циклы движения, и мы действительно можем измерять протекшее время, подсчитывая число оборотов (или долей оборотов), которые стрелка совершит за время между выбранными событиями.

Конечно, выражение «идеально регулярные циклы движения» неявно использует понятие времени, поскольку слово «равномерные» означает одинаковую длительность каждого цикла. С практической точки зрения мы решаем эту задачу, изготавливая часы из простых физических компонентов, которые основаны на фундаментальных явлениях и, согласно нашим представлениям, будут участвовать в повторяющихся циклических процессах, никак не изменяющихся от цикла к циклу. Простыми примерами являются дедушкины часы с качающимся туда-сюда маятником, а также атомные часы, основанные на повторяющихся атомных процессах.

Наша цель состоит в том, чтобы понять, как движение влияет на ход времени. Поскольку мы определили время, используя понятие часов, мы можем заменить наш вопрос другим: «Как движение влияет на ход часов?» Важно в самом начале подчеркнуть, что наше обсуждение не будет касаться того, как механические элементы конкретных часов реагируют на толчки и удары, которые могут возникать при движении по тряской дороге. Мы будем рассматривать только простейший и самый ясный тип движения с совершенно постоянной скоростью. Следовательно, часы не будут испытывать никакой тряски или ударов. Нас будет интересовать фундаментальный вопрос: как движение влияет на ход времени, т. е. в чем состоит фундаментальное влияние движения на ход всех часов, независимо от их внешнего вида или конструкции.

Для этой цели мы будем использовать самые простые по принципу действия (но и самые непрактичные) часы. Они известны под названием «световых часов» и состоят из двух зеркал, закрепленных друг напротив друга, между которыми движется один фотон, поочередно отражающийся от каждого из них (см. рис. 2.1).

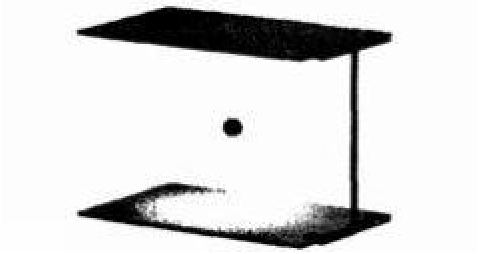

Рис 2.1. Часы «тикают» каждый раз, когда фотон завершает свой путь туда и обратно

Если зеркала расположены на расстоянии примерно 15 см друг от друга, путешествие фотона «туда и обратно» между зеркалами займет примерно одну миллиардную долю секунды. Будем считать, что один «тик» часов происходит каждый раз, как фотон завершает свой путь туда и обратно; следовательно, один миллиард тиков соответствует одной секунде.

Мы можем использовать световые часы как секундомер для измерения времени, прошедшего между двумя событиями – для этого мы подсчитываем, сколько тиков этих часов произошло в течение интересующего нас периода, и умножаем это число на длительность одного тика. Например, если мы хронометрируем лошадиные бега и установили, что число тиков движения фотона между стартом и финишем составило 55

миллиардов, мы можем утверждать, что скачки длились 55 секунд.

Причина, по которой мы используем световые часы, состоит в том, что их механическая простота не требует лишних деталей и, тем самым, дает ясное понимание того, как движение влияет на ход времени. Для того чтобы убедиться в этом, представим себе, что мы наблюдаем за ходом световых часов, стоящих на соседнем столе. Затем вдруг появляются вторые световые часы, движущиеся мимо первых с постоянной скоростью (см. рис. 2.2).

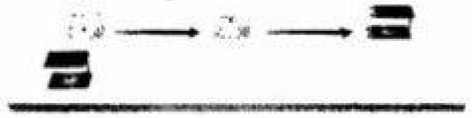

Рис. 2.2. На переднем плане расположены неподвижные световые часы. Световые часы, расположенные в глубине, движутся с постоянной скоростью

Вопрос, который мы задаем, состоит в следующем: будут ли движущиеся часы идти с той же скоростью, что и неподвижные?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим с нашей точки зрения путь, который должен пройти фотон в движущихся часах за время одного тика. Фотон начинает свой путь от основания движущихся часов, как показано на рис. 2.2, и сначала движется к верхнему зеркалу. Поскольку с нашей точки зрения сами часы движутся, фотон должен перемещаться под углом, как показано на рис. 2.3.

Рис. 2.3. С нашей точки зрения фотон в движущихся часах перемещается по диагональному пути

Если фотон не будет двигаться по этому пути, он не попадет в верхнее зеркало и вылетит из часов. Поскольку наблюдатель, находящийся на движущихся часах, с полным основанием может считать эти часы неподвижными, а весь окружающий мир движущимся, мы уверены, что фотон попадет в верхнее зеркало и, следовательно, изображенная траектория является правильной. Фотон отражается от верхнего зеркала и снова движется по диагонали, для того чтобы попасть в нижнее зеркало. Этим завершается тик движущихся часов. Простой, но существенный момент состоит в том, что удвоенный диагональный путь, которым представляется траектория движения фотона, длиннее, чем путь вверх-вниз по прямой, по которому движется фотон в непо-движных часах. В дополнение к движению вверх и вниз по вертикали, фотон в движущихся часах, с нашей точки зрения, должен также перемещаться вправо. Далее, постоянство скорости света говорит нам, что фотон в движущихся часах перемещается с той же скоростью, что и фотон в неподвижных часах. Но поскольку он должен пройти большее расстояние, чтобы выполнить один тик, его тики будут более редкими. Этот простой аргумент устанавливает, что с нашей точки зрения движущиеся световые часы будут идти медленнее, чем неподвижные. И, поскольку мы согласились, что число тиков непосредственно отражает продолжительность прошедшего времени, мы видим, что для движущихся часов ход времени замедляется. У читателя может возникнуть вопрос, не может ли это быть просто отражением какого-то особого свойства световых часов, которое не распространяется на дедушкин хронометр или на часы фирмы «Ролекс». Будет ли время, измеренное более привычными часами, тоже замедляться? Использование принципа относительности дает нам в ответ обнадеживающее «да». Закрепим часы «Ролекс» на верхней части каждых из наших световых часов и вернемся к предыдущему эксперименту. Как уже говорилось, неподвижные часы и прикрепленный к ним «Ролекс» измерят одинаковое время, при этом одному миллиарду тиков световых часов будет соответствовать одна секунда, измеренная «Ролексом». А как насчет движущихся световых часов и того «Ролекса», который прикреплен к ним? Замедлится ли ход движущегося «Ролекса», будет ли он идти синхронно со световыми часами, на которых он закреплен? Чтобы сделать наше рассуждение более убедительным, представим, что установка, состоящая из световых часов и прикрепленного к ним «Ролекса», движется потому, что она прикручена болтами к полу не

имеющего окон вагона поезда, движущегося по идеально прямым рельсам с постоянной скоростью. Согласно принципу относительности, для наблюдателя, находящегося в поезде, не существует способа обнаружить какое-либо влияние движения поезда. Однако если световые часы и «Ролекс» не будут показывать одинаковое время, это как раз и будет очевидным признаком влияния движения. Таким образом, движущиеся световые часы и прикрепленный к ним «Ролекс» должны продолжать показывать одинаковое время; «Ролекс» должен замедлить свой ход ровно в той же степени, что и световые часы. Независимо от марки, типа или устройства, часы, которые движутся друг относительно друга, будут регистрировать различный ход времени.

Обсуждение световых часов показывает также, что точная разница в показаниях времени между неподвижными и движущимися часами зависит от того, насколько дальше должен переместиться фотон в движущихся часах, чтобы завершить элементарный цикл. Это, в свою очередь, зависит от того, насколько быстро перемещаются движущиеся часы: с точки зрения неподвижного наблюдателя, чем быстрее двигаются часы, тем дальше вправо должен улететь фотон. Таким образом, мы приходим к выводу, что при сравнении с неподвижными часами ход движущихся часов будет становиться тем медленнее, чем быстрее они движутся3'.

Чтобы получить представление о масштабах описываемого явления, заметим, что фотон совершает свой тик за время, равное примерно одной миллиардной доле секунды. Чтобы часы могли пройти заметное расстояние в течение одного тика, они должны двигаться очень быстро – их скорость должна составлять существенную долю скорости света. При движении с обычными скоростями, скажем, 16 км/ч, расстояние, на которое они переместятся вправо за один тик, будет микроскопическим – всего около 0,5 миллионных долей сантиметра. Дополнительное расстояние, которое должен пройти движущийся фотон, будет ничтожным и, соответственно, ничтожным будет влияние на скорость хода движущихся часов. Опять же, в силу принципа относительности, это справедливо для всех часов, т. е. для самого времени. Поэтому существа типа нас, перемещающиеся по отношению друг к другу со столь малыми скоростями, обычно остаются в неведении об искажении хода времени. Хотя соответствующие эффекты, конечно, присутствуют, они невероятно малы. С другой стороны, если бы мы могли, при-хватив с собой движущиеся часы, перемешаться со скоростью, равной, скажем, трем четвертям скорости света, то, согласно уравнениям специальной теории относительности, неподвижный наблюдатель установил бы, что наши часы идут со скоростью, равной двум третям от скорости хода его часов. Согласитесь, это заметная разница.

Жизнь на бегу

Мы увидели, что постоянство скорости света ведет к тому, что движущиеся световые часы будут идти медленнее, чем неподвижные. Согласно принципу относительности, это должно быть справедливо не только для световых, но и для любых других часов, т. е. это должно быть справедливо для самого времени. Для наблюдателя, находящегося в движении, время течет медленнее, чем для неподвижного. Если довольно простое рассуждение, которое привело нас к этому выводу, является верным, то не сможет ли человек прожить дольше, находясь в движении, по сравнению с тем случаем, когда он остается неподвижным? В конце концов, если время течет медленнее для человека, находящегося в движении, по сравнению с тем, кто остается в покое, тогда это различие должно распространяться не только на время, измеренное с помощью часов, но и на время, отсчитанное по ударам сердца, и на старение организма. Недавно было получено прямое подтверждение того, что это действительно так, правда, речь шла не о средней продолжительности жизни человека, а о свойствах частиц микромира – мюонов. Однако здесь есть одна хитрость, которая не позволяет нам объявить, что найден источник вечной молодости.

Мюоны, находящиеся в покое в лаборатории, разрушаются в ходе процесса, который

очень напоминает радиоактивный распад, причем средняя продолжительность существования мюона составляет две миллионных доли секунды. Это разрушение представляет собой экспериментальный факт, подтвержденный огромным фактическим материалом. Все это выглядит так, как если бы мюон жил с пистолетом, приставленным к виску; когда он достигает возраста в две миллионные доли секунды, он нажимает на спусковой крючок и разлетается на электроны и нейтрино. Однако когда эти мюоны не сидят в покое в лаборатории, а мчатся в устройстве, называемом ускорителем частиц, который разгоняет их почти до скорости света, их средняя продолжительность жизни, измеренная учеными, резко увеличивается. Это действительно происходит. При скорости 298 000 км/с (примерно 99,5 % скорости света) время жизни мюона увеличивается в десять раз. Объяснение, согласно специальной теории относительности, состоит в том, что «наручные часы», которые носят мюоны, идут гораздо медленнее, чем лабораторные часы. Поэтому спустя долгое время после того, как лабораторные часы покажут, что мюону пора нажимать на спусковой крючок и погибать, часы, которые носит мчащийся мюон, будут показывать, что до рокового момента еще далеко. Это весьма непосредственная и очень яркая демонстрация влияния движения на течение времени. Если бы люди носились с такой же скоростью, как мюоны, продолжительность их жизни возросла бы во столько же раз. Вместо того чтобы жить семьдесят лет, люди жили бы 700 4).

Где же подвох? Хотя лабораторные наблюдатели видят, что движущиеся с большой скоростью мюоны живут гораздо дольше, чем их неподвижные собратья, это связано с тем, что для мюонов, находящихся в движении, время течет намного медленнее. Это замедление времени распространяется не только на часы, которые они носят, но и на все виды их деятельности. Например, если неподвижный мюон может прочитать 100 книг за время своей короткой жизни, то его мчащийся с большой скоростью родственник сможет прочитать те же самые 100 книг, поскольку, хотя продолжительность его жизни увеличится по сравнению с неподвижным мюоном, скорость чтения, а также всего другого в его жизни уменьшится в такое же число раз. С точки зрения лабораторного наблюдателя это равносильно тому, что движущийся мюон живет медленной жизнью; он живет дольше, чем неподвижный мюон, но «количество жизни»останется тем же самым. Такой же вывод, конечно, будет справедлив и для мчащихся людей с их средней продолжительностью жизни, измеряемой веками. С их точки зрения это будет обычная жизнь. С нашей точки зрения они будут жить в чрезвычайно замедленном ритме и поэтому средняя продолжительность их жизни составляет огромный промежуток нашего времени.

И все же: кто движется?

Относительность движения является ключом к пониманию теории Эйнштейна и одновременно источником недоразумений. Вы могли заметить, что перестановка точек зрения приводит к взаимному изменению ролей «движущихся» мюонов, чьи часы, как мы установили, идут медленно, и их «неподвижных» собратьев. В случае с Джорджем и Грейс каждый из них имел равное право объявить себя неподвижным, а другого – движущимся. Но мюоны, о которых мы говорим, что они движутся, также имеют все основания сказать, что с их точки зрения неподвижными являются они, а движутся (в противоположном направлении) те мюоны, которые названы «неподвижными». Это ведет к совершенно противоположному выводу, что часы, которые носят мюоны, названные нами неподвижными, идут медленнее, чем часы мюонов, которых мы считали движущимися.

Рассматривая подписание договора с помощью сигнальной лампы, мы уже сталкивались с ситуацией, в которой различные точки зрения ведут к выводам, выглядящим совершенно несовместимыми. Тогда мы, следуя основным принципам специальной теории относительности, отказались от изжившей себя концепции, состоящей в том, что каждый, независимо от состояния его движения, согласится с тем, что события произошли одновременно. Однако то противоречие, которое мы рассматриваем сейчас, выглядит хуже.

Как может каждый из двух наблюдателей заявлять, что часы другого идут медленнее? Еще более поразительно то, что различные, но одинаково правомерные точки зрения мюонов, похоже, приводят к заключению, что каждая группа объявит, скорбно, но твердо, что они умрут первыми. Мы усвоили, что мир может иметь некоторые неожиданно странные свойства, но хранили надежду, что он хотя бы не будет логически противоречив. Так что же происходит?

Как и со всеми кажущимися парадоксами, вытекающими из специальной теории относительности, эти логические противоречия разрешаются при более тщательном изучении, позволяя по-новому глубже понять устройство Вселенной. Чтобы избежать еще большего антропоморфизма, вернемся от мюонов к Джорджу и Грейс, которые теперь в дополнение к сигнальным огням имеют на своих скафандрах яркие цифровые часы. С точки зрения Джорджа он неподвижен, а Грейс, с ее зелеными сигнальными огнями и большими цифровыми часами, появляется вдалеке и проплывает мимо него во мраке пустого космического пространства. Он замечает, что часы Грейс идут медленнее, чем его часы (степень замедления зависит от скорости, с которой они пролетают мимо друг друга). Если бы он был хоть чуть наблюдательнее, он мог бы заметить, что не только часы у Грейс идут медленнее, но и все, что она делает – то, как она помахала ему рукой, скорость, с которой она мигала глазами, – все происходит в замедленном темпе. С точки зрения Грейс те же самые наблюдения относятся к Джорджу.

Это кажется парадоксальным, однако давайте попробуем поставить точный эксперимент, который разрешит логическое противоречие. Простейшая возможность состоит в том, чтобы, когда Джордж и Грейс встретятся в пространстве, они оба установили свои часы на 12:00. Так как они путешествуют по отдельности, каждый утверждает, что часы другого отстают. Чтобы избежать этого противоречия, Джордж и Грейс должны встретиться вновь и сравнить, сколько времени прошло на их часах. Но как они могут сделать это? Ну да, у Джорджа ведь есть ранцевый двигатель, который он может использовать, чтобы, как он считает, догнать Грейс. Но если он сделает это, симметрия двух точек зрения, которая является причиной парадокса, будет нарушена, поскольку Джорджу придется испытать дей-ствие ускорения, которое не является свободным движением. Когда они воссоединятся таким манером, часы Джорджа точно будут показывать меньше времени, так как он теперь определенно может сказать, что он был в движении, поскольку ощущал его. Теперь точки зрения Джорджа и Грейс перестают быть равноправными. Включив свой ранцевый двигатель, Джордж отказался от утверждения, что он находится в покое.

Если Джордж последует за Грейс подобным образом, различия в показаниях их часов будут зависеть от их относительной скорости и от того, как Джордж использовал свой ранцевый двигатель. Как нам уже известно, если скорости малы, различия должны быть минимальны. Но если скорость составляет значительную часть скорости света, различие может достигать минут, суток, лет, веков и более. В качестве конкретного примера представим, что относительная скорость Джорджа и Грейс, когда они разлетаются в разные стороны, составляет 99,5 % от скорости света. Далее, пусть по своим часам Джордж ждет 3 года и включает свой ранцевый двигатель, который мгновенным толчком посылает его назад к Грейс с той скоростью, с которой они перед этим разлетались, т. е. равной 99,5 % скорости света. Когда он достигает Грейс, по его часам проходит 6 лет, так как чтобы догнать Грейс, ему нужно 3 года. В то же время, как показывает математика специальной теории относительности, по ее часам пройдет 60 лет. Это не шутка: Грейс придется основательно покопаться в памяти, чтобы вспомнить Джорджа, проплывшего мимо нее в пространстве 60 лет назад. С другой стороны, для Джорджа это было всего 6 лет назад. Фактически, движение Джорджа сделало его путешественником во времени, хотя и в очень узком смысле: он совершил путешествие в будущее Грейс.

Необходимость поставить часы рядом, чтобы непосредственно сравнить показания, может показаться незначащей деталью, но в действительности именно в этом суть дела. Можно придумать множество фокусов для того, чтобы обойти это слабое место парадокса,

но все они неизбежно провалятся. Например, пусть вместо того, чтобы соединять часы, Джордж и Грейс сравнят их показания, созвонившись по сотовому телефону? Если бы такая связь была мгновенной, мы бы столкнулись с непреодолимым противоречием: с точки зрения Грейс часы Джорджа идут медленнее, и, следовательно, он должен сообщить, что прошло меньше времени; в то же время с точки зрения Джорджа замедлили ход часы Грейс, поэтому именно она должна сказать, что прошло меньше времени. Они оба не могут быть правы, и мы попадаем в затруднительное положение. Ключевым моментом здесь, конечно, является то, что как любой другой вид связи, сотовые телефоны не могут передавать сообщения мгновенно. Сотовые телефоны используют радиоволны, которые представляют собой разновидность электромагнитных колебаний, следовательно, сигналы, которые они передают, распространяются со скоростью света. Это означает, что необходимо некоторое время на то, чтобы сигналы достигли адресата, что дает достаточную задержку для того, чтобы точки зрения наблюдателей перестали противоречить друг другу.

Попробуем сначала увидеть картину глазами Джорджа. Представим, что через каждый час Джордж повторяет в свой сотовый телефон: «Двенадцать часов дня, полет нормальный»; «час дня, полет нормальный» и т. д. Поскольку с его точки зрения часы Грейс замедлились, на первый взгляд, он подумает, что Грейс будет получать эти сообщения до того, как на ее часах настанет час, указанный в сообщении. Поэтому он будет считать, что Грейс должна согласиться с тем, что ее часы идут медленнее. Но потом он подумает: «Поскольку Грейс удаляется от меня, сигнал, который я посылаю ей по сотовому телефону, должен проходить все большее расстояние, чтобы достичь ее. Может быть, время, затрачиваемое на то, чтобы пройти это дополнительное расстояние, компенсирует замедление ее часов». Догадка Джорджа о том, что здесь есть два конкурирующих эффекта – замедление хода часов Грейс и время пробега его сигнала, – заставляет его присесть и попытаться количественно оценить суммарный эффект этих двух величин. Полученный им результат показывает, что эффект времени пробегас избытком компенсирует замедление хода часов Грейс. Он приходит к удивительному выводу, что Грейс будет получать его сообщения о том, что наступил очередной час, после того, как этот час наступит на ее часах. В действительности, поскольку Джордж осведомлен о том, что Грейс хорошо знает физику, он понимает, что она учтет время пробега сигнала при оценке хода его часов на основе его сообщений по сотовому телефону. Небольшие дополнительные расчеты показывают, что даже с учетом времени пробега выполненный Грейс анализ сообщений Джорджа приведет ее к выводу, что его часы замедлились сильнее, чем ее.

Точно такой же анализ может быть проведен, если мы примем точку зрения Грейс на ее сообщения Джорджу о том, что прошел очередной час. Сначала замедление хода часов Джорджа (с ее точки зрения) заставит ее подумать, что он получит ее очередное сообщение до того, как пошлет свое собственное. Но когда она вспомнит, что ее сигнал должен пройти все увеличивающееся расстояние, чтобы достичь удаляющегося в темноту Джорджа, она поймет, что на самом деле он будет получать их после того как отправит свои. Опять же, она поймет, что даже если Джордж учтет время пробега согласно ее сообщениям по сотовому телефону, он будет считать, что ее часы идут медленнее, чем его.

До тех пор, пока Джордж или Грейс не испытают ускорения, их точки зрения будут совершенно равно обоснованы. Каким бы парадоксальным это ни казалось, они поймут, что каждый имеет полное право считать, что часы другого замедлили ход.

Влияние движения на пространство

Предыдущее обсуждение показало, что с точки зрения наблюдателя движущиеся часы идут медленнее, чем его собственные, т. е. что ход времени зависит от движения. Теперь мы сделаем еще один шаг и увидим, что движение оказывает столь же поразительное влияние на пространство. Вернемся к Слиму и Джиму, которые находятся на автодроме.

Как мы уже говорили, находясь в автосалоне, Слим тщательно измерил рулеткой длину

своего нового автомобиля. Когда Слим мчался по гоночной полосе, Джим не мог использовать этот способ для измерения длины автомобиля, поэтому он применил косвенный метод. Один из таких методов, как мы указывали выше, состоит в следующем: Джим запускает секундомер, когда его достигает передний бампер автомобиля, и останавливает, когда мимо проходит задний бампер. Умножив полученное время на скорость автомобиля, Джим может определить его длину.

Используя наше вновь обретенное знание тайн времени, мы понимаем, что с точки зрения Слима сам он неподвижен, а Джим движется и, следовательно, Слим видит, что часы Джима замедлили свой ход. В результате Слиму становится ясно, что косвенное измерение длины автомобиля, проведенное Джимом, даст заниженное значение по сравнению с тем, которое он получил в автосалоне, поскольку в своих расчетах (длина равна скорости, умноженной на время) Джим использовал время, полученное с помощью часов, которые замедлили свой ход. Если часы идут медленнее, и время, которое он получит, будет меньше, – в результате его вычисления дадут меньшую длину.

Исходя из этого, Джим поймет, что в движении длина автомобиля Слима меньше, чем когда автомобиль находится в состоянии покоя. Это пример проявления общего принципа, состоящего в том, что наблюдатели видят сокращение движущегося объекта в направлении его перемещения. Например, уравнения специальной теории относительности показывают, что если тело движется со скоростью, составляющей примерно 98 % скорости света, то неподвижный наблюдатель будет видеть его сократившимся на 80 % по сравнению с длиной тела в состоянии покоя. Это явление иллюстрируется рис. 2.4.

Рис. 2.4. Движущийся объект сокращается в направлении своего движения

Движение в пространстве-времени

Постулат постоянства скорости света привел к замене традиционного представления о пространстве и времени как о неизменных и объективных величинах новым понятием, где пространство и время неразрывно зависят от относительного движения наблюдателя и объекта наблюдения. Поняв, что движущиеся объекты сокращаются в направлении движения, мы могли бы на этом закончить обсуждение. Однако специальная теория относительности еще глубже объединяет все рассмотренные нами явления.

Чтобы понять это, представим себе не очень практичный автомобиль, который быстро достигает фиксированной рекомендуемой скорости 160 км/ч и поддерживает ее, не ускоряясь и не замедляясь, пока не будет выключен двигатель, и он прокатится по инерции до остановки.

Представим также, что растущая известность Слима как талантливого пилота привела к тому, что он получил предложение провести испытания этого автомобиля на длинной, прямой и широкой трассе, расположенной посреди плоской равнины в пустыне. Поскольку расстояние между стартом и финишем составляет 16 км, автомобиль должен покрыть это расстояние за одну десятую часть часа, т.е. за шесть минут. Просматривая результаты десятков испытательных заездов, Джим, подрабатывающий автомобильным инженером, столкнулся с тем, что хотя большинство результатов в точности равнялось шести минутам, несколько последних были существенно хуже: 6,5, 7 и даже 7,5 минут. Сначала он заподозрил наличие какой-то неисправности, поскольку такое время указывало на то, что в течение последних трех заездов автомобиль двигался медленнее, чем со скоростью 160 км/ч. Однако тщательное исследование автомобиля убедило его, что тот находится в превосходном состоянии. Не сумев понять причину таких необычных результатов, он обратился к Слиму, попросив его рассказать об этих последних заездах. Объяснение Слима оказалось простым. Он сказал Джиму, что поскольку трасса проходит с востока на запад, а

заезды проходили в конце дня, Солнце било ему прямо в глаза. В течение последних трех заездов условия были столь плохими, что он отклонился от оси трассы на небольшой угол. Он нарисовал свой путь в ходе трех последних заездов, который показан на рис. 2.5. Причина появления трех последних результатов стала совершенно ясна: путь от линии старта до линии финиша при движении под углом к оси трассы будет больше, следовательно, при той же самой скорости в 160 км/ч он займет больше времени. Другими словами, при движении по пути, проходящему под углом, часть скорости в 160 км/ч уходит на движение в направлении с юга на север, в результате на то, чтобы пройти маршрут с востока на запад, останется меньше скорости. Поэтому, чтобы пройти трассу, требуется немного больше времени.

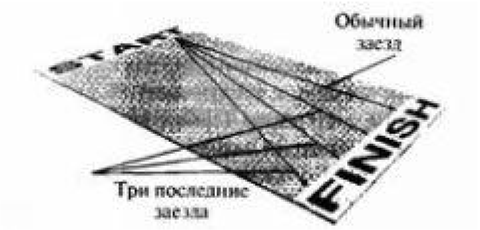

Рис. 2.5. Из-за того что Солнце в конце дня слепило в глаза, в течение последних трех заездов Слим двигался под все более увеличивающимся углом

Как уже отмечалось, объяснение Слима является простым и понятным. Однако оно заслуживает того, чтобы немного его перефразировать ради концептуального прорыва. Направления с севера на юг и с востока на запад представляют собой два независимых пространственных измерения, в которых может двигаться автомобиль. (Он может также перемещаться в вертикальном направлении, например, при движении через горный перевал, однако в данном случае эта возможность нас не интересует.) Объяснение Слима показывает: несмотря на то, что в ходе каждого заезда автомобиль двигался со скоростью 160 км/ч, в тех последних заездах движение разделялось между двумя направлениями, и поэтому казалось, что в направлении восток-запад оно происходит со скоростью меньше 160 км/ч. В предшествующих заездах все 160 км/ч тратились исключительно на движение с востока на запад; в трех последних заездах эта скорость была частично направлена с севера на юг.

Эйнштейн обнаружил, что точно та же идея – разделение движения между различными измерениями – лежит в основе всех замечательных физических проявлений специальной теории относительности, если только мы осознаем, что движение тела распределяется не только между пространственными измерениями, но что временное измерение также может принимать участие в этом разделении. На самом деле, в большинстве случаев большая часть перемещения объекта происходит как раз во времени, а не в пространстве. Посмотрим, что это означает.

Понятие движения в пространстве приходит в нашу жизнь очень рано. Хотя и нечасто приходится думать об этом с такой точки зрения, нам также известно, что мы, наши друзья, окружающие нас вещи и т.д. движемся во времени. Даже если мы праздно сидим перед телевизором и бросаем взгляд на стенные или наручные часы, мы видим, что стрелки на часах неумолимо движутся вперед, постоянно «перемещаясь вперед во времени». Мы и все, что нас окружает, стареем, неизбежно переходя от одного момента времени к следующему. В действительности, математик Герман Минковский, а затем и Эйнштейн являлись сторонниками представления о времени как еще об одном измерении Вселенной, в некоторых отношениях весьма похожим на три пространственных измерения, в которые мы погружены. Хотя это и звучит на первый взгляд абстрактно, понятие времени как измерения на самом деле вполне конкретно. Когда мы хотим с кем-то встретиться, мы говорим, где «в пространстве» мы рассчитываем встретиться с ним – например, на 9 этаже здания на углу 53-й улицы и 7-й авеню. В этом описании содержатся три элемента информации (9 этаж, 53-я улица, 7-я авеню), описывающих конкретное место в трех пространственных измерениях Вселенной. Не менее важным, однако, является указание времени нашей встречи, например,

в 3 часа пополудни. Эта часть информации говорит нам, где «во времени» состоится наша встреча. Следовательно, события описываются четырьмя элементами информации: тремя, указывающими расположение в пространстве, и одним, указывающим положение во времени. Подобные данные, как принято говорить, характеризуют положение события в пространстве и времени или, для краткости, в пространстве-времени. В этом смысле время представляет собой еще одно измерение.

Поскольку с этой точки зрения пространство и время являются просто различными примерами измерений, можем ли мы говорить о скорости движения объекта во времени подобно тому, как мы говорим о скорости его движения в пространстве? Да, можем.

Ключ к разгадке того, как это сделать, можно найти в рассмотренных выше основных положениях. Когда тело движется в пространстве относительно нас, его часы идут медленнее по сравнению с нашими. Иными словами, скорость его движения во времени замедляется. Новая идея, которую мы должны понять, состоит в следующем. Эйнштейн провозгласил, что все объекты во Вселенной всегда движутся в пространстве-времени с одной постоянной скоростью – скоростью света. На первый взгляд, эта идея выглядит странно, – мы привыкли к тому, что объекты обычно движутся со скоростями, которые значительно меньше скорости света. Мы неоднократно подчеркивали, что именно по этой причине релятивистские эффекты столь непривычны в нашей повседневной жизни. Все это правда. Но сейчас мы говорим о суммарной скорости тел во всех четырех измерениях – трех пространственных и одном временном, и скорость тела равна скорости света именно в этом обобщенном смысле.Для того чтобы полнее понять это положение и осознать его важность, заметим, что как в случае с непрактичным «односкоростным» автомобилем, рассмотренным выше, эта одна скорость может быть разделена между различными измерениями пространства и времени. Если тело неподвижно (по отношению к нам) и, следовательно, совсем не движется в пространстве, то, по аналогии с первыми заездами автомобиля, все движение тела приходится на перемещение в одном измерении, – в нашем случае, во временном измерении. Более того, все тела, которые находятся в покое по отношению к нам и друг к другу, движутся во времени (стареют) с совершенно одинаковой скоростью. Однако если тело движется в пространстве, это означает, что часть его движения во времени будет отвлечена. Как в случае с автомобилем, движущимся под углом, это разделение движения означает, что во времени тело будет двигаться медленнее, чем его неподвижные собратья, поскольку часть его движения будет отвлечена на перемещение в пространстве. Это означает, что часы будут идти медленнее, если они перемещаются в пространстве. Именно с этим мы сталкивались ранее. Теперь мы видим, что время замедляется, когда тело движется относительно нас потому, что оно отвлекает часть своего движения во времени на движение в пространстве. Таким образом, скорость движения тела в пространстве является просто отражением того, какая часть отвлекается от движения тела во времени6'.

Мы также видим, что отсюда немедленно следует факт существования ограничения на скорость тела в пространстве: максимально возможная скорость движения в пространстве будет достигнута, если все движение тела во времени перейдет в движение в пространстве. Это происходит тогда, когда все движение со скоростью света во времени направляется на движение со скоростью света в пространстве. Но если задействована вся скорость движения во времени, получится наибольшая скорость движения в пространстве, которую только может развить любое тело. В нашем примере с автомобилем это соответствует случаю, когда автомобиль движется строго в направлении север-юг. У автомобиля в этом случае не остается скорости на движение в направлении восток-запад. Так и у тела, перемещающегося в пространстве со скоростью света, не остается скорости на движение во времени. Поэтому фотоны никогда не стареют; фотон, который был излучен во время Большого взрыва, имеет тот же самый возраст, который он имел тогда. Ход времени останавливается по достижении скорости света.

Как насчет E = mc2?

Хотя Эйнштейн не был сторонником того, чтобы его теория называлась «теорией относительности» (предлагая вместо этого термин «теория инвариантности», которое, помимо всего прочего, отражает неизменность скорости света), теперь нам понятен смысл этого термина. Работа Эйнштейна показала, что понятия пространства и времени, которые раньше казались независимыми и абсолютными, на самом деле тесно взаимосвязаны и являются относительными. Эйнштейн пошел дальше и выяснил, что и другие физические характеристики мироздания неожиданно тесно связаны между собой. Его самое знаменитое уравнение дает один из наиболее важных примеров такой связи. В этом уравнении Эйнштейн утверждает, что энергия объекта (E) и его масса (т) не являются независимыми величинами; зная массу, мы можем определить энергию (умножив массу на квадрат скорости света, c2), а зная энергию, мы можем рассчитать массу (разделив энергию на квадрат скорости света). Иными словами, энергия и масса, подобно долларам и евро, являются конвертируемыми валютами. Однако в отличие от денег, обменный курс, равный квадрату скорости света, зафиксирован раз и навсегда. Поскольку этот обменный курс столь велик (c2 – очень большое число), то энергии, сосредоточенной в небольшой массе, может хватить надолго. Мир уже столкнулся с огромной разрушительной мощью, возникшей при превращении менее одного процента от 900 граммов урана в энергию в Хиросиме. Наступит день,когда, используя термоядерные энергетические установки, мы сможем продуктивно использовать формулу Эйнштейна для удовлетворения энергетических потребностей всего человечества с помощью неисчерпаемых запасов морской воды. С точки зрения положений, которые мы развивали в этой главе, уравнение Эйнштейна дает наиболее четкое объяснение фундаментальному факту, состоящему в том, что ничто не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света. У вас может возникнуть вопрос, почему, например, нельзя взять какой-нибудь объект, скажем мюон, разогнать его на ускорителе до 298 000 км/с, т. е. до 99,5 % скорости света, потом «толкнуть его чуть посильнее», сообщив ему скорость в 99,9 % световой, а после этого «врезать ему по-настоящему», заставив пробить барьер световой скорости. Формула Эйнштейна объясняет, почему подобные усилия никогда не увенчаются успехом. Чем быстрее движется тело, тем выше его энергия, а, как показывает формула Эйнштейна, чем больше энергия тела, тем больше его масса. Например, мюон, двигающийся со скоростью, составляюшей 99,9 % световой, весит намного больше, чем его неподвижные собратья. В действительности он будет примерно в 22 раза тяжелее. (Массы, приведенные в табл. 1.1, относятся к частицам, находящимся в состоянии покоя.) Но чем больше масса объекта, тем труднее увеличить его скорость. Подталкивать ребенка, едущего на велосипеде, – это одно, а толкать тяжелый грузовик – совсем другое. Поэтому, чем быстрее движется мюон, тем труднее увеличить его скорость. При скорости, составляющей 99,999% скорости света, масса мюона увеличится в 224 раза; при скорости в 99,99999999 % от световой она возрастет более чем 70 000 раз. Поскольку масса мюона неограниченно возрастает при приближении его скорости к скорости света, потребуется затратить бесконечно большое количество энергии, чтобы он достиг или преодолел световой барьер. Это, конечно, невозможно, и поэтому ничто не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света.

Как мы увидим в следующей главе, этот вывод посеял семена второго крупного противоречия, с которым столкнулись физики в течение прошлого столетия, и которое, в конечном счете, обрекло на гибель еще одну почтенную и уважаемую теорию – ньютоновскую универсальную теорию тяготения.

Глава 3. 0б искривлениях и волнистой ряби

В специальной теории относительности Эйнштейн разрешил конфликт между накопленными за века интуитивными представлениями о движении и постоянством скорости света. Вкратце его выводы состояли в том, что наша интуиция имеет изъяны – она

срабатывает при скоростях, которые обычно чрезвычайно малы по сравнению со скоростью света и поэтому скрывают истинную суть пространства и времени. Специальная теория относительности раскрыла их природу и показала, что она радикально отличается от существовавших ранее представлений. Однако переосмысление понятий пространства и времени оказалось нелегким делом. Эйнштейн вскоре осознал, что одно из многочисленных следствий специальной теории относительности является особенно глубоким: утверждение, что ничто не может превысить скорость света, оказалось несовместимым со всеми уважаемой ньютоновской теорией всемирного тяготения, сформулированной во второй половине XVII в. Таким образом, разрешив одно противоречие, специальная теория относительности породила другое. После десятилетия интенсивных, иногда мучительных исследований, Эйнштейн разрешил эту дилемму в общей теории относительности. В этой теории он еще раз совершил революцию в понимании свойств пространства и времени, показав, что они искривляются и деформируются, передавая действие силы тяжести.

Ньютоновский взгляд на гравитацию

В 1642 г. в Линкольншире в Англии родился Исаак Ньютон, который изменил лицо науки, поставив всю мощь математики на службу физическим исследованиям. Интеллект Ньютона был столь всеобъемлющ, что, например, когда он однажды обнаружил, что не существует математического аппарата, требуемого для проводимых им исследований, он создал его. Прошло почти три столетия, прежде чем наш мир снова посетил гений сопоставимого масштаба. Ньютону мы обязаны многими глубокими проникновениями в сущность мироздания. Для нас первостепенное значение будет иметь его теория всемирного тяготения.

Сила тяжести везде вокруг нас в повседневной жизни. Она удерживает нас и все окружающие тела на поверхности Земли, не позволяет воздуху, которым мы дышим, ускользнуть в космическое пространство, удерживает Луну на орбите вокруг Земли, а Землю – на орбите вокруг Солнца. Сила тяжести диктует ритм космического танца, который неустанно и педантично исполняется миллиардами миллиардов обитателей Вселенной, от астероидов до планет, от звезд до галактик. Более трех столетий авторитет Ньютона заставлял нас принимать на веру, что одна только сила тяготения отвечает за все разнообразие земных и внеземных событий. Однако до Ньютона не было понимания того, что падение яблока с дерева есть проявление того же закона, который удерживает планеты на орбитах вокруг Солнца. Сделав отважный шаг в сторону гегемонии науки, Ньютон объединил физические принципы, управляющие Землей и небесами, и объявил силу тяжести невидимой рукой, действующей в обеих сферах.

Ньютоновскую концепцию тяготения можно было бы назвать великим уравнителем. Ньютон объявил, что абсолютно всеоказывает воздействие на абсолютно все во Вселенной. Это воздействие представляет собой силу тяжести, которая является силой притяжения. Независимо от физической структуры, все оказывает и все испытывает воздействие силы тяжести. Основываясь на тщательном анализе проведенного Иоганнесом Кеплером изучения движения планет, Ньютон пришел к выводу, что сила гравитационного притяжения между двумя телами зависит только от двух величин: от количества вещества в каждом теле и от расстояния между ними. Вещество означает материю, состоящую из протонов, нейтронов и электронов, которые, в свою очередь, определяют массу объекта. Ньютоновская теория всемирного тяготения утверждает, что сила притяжения между двумя телами будет больше для тел большей массы и меньше для тел меньшей массы; она также утверждает, что сила притяжения увеличивается при уменьшении расстояния между телами, и уменьшается при увеличении расстояния.

Ньютон не просто дал это качественное описание, он сделал больше, сформулировав уравнения, количественно описывающие силу тяжести, действующую между двумя телами. Конкретно, эти уравнения утверждают, что сила тяготения между двумя телами

пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Этот «закон тяготения» может быть использован для предсказания движения планет и комет вокруг Солнца, Луны вокруг Земли и ракет, отправляющихся для исследования планет, а также для решения более приземленных задач – расчета траектории полета мячика или прыгуна с трамплина, крутящего сальто над бассейном. Согласие между предсказаниями и результатами наблюдений за фактическим движением тел является поразительным. Этот успех обеспечивал теории Ньютона безоговорочную поддержку вплоть до первой половины XX в. Однако открытие Эйнштейном специальной теории относительности выдвинуло проблемы, ставшие непреодолимым препятствием для теории Ньютона.

Несовместимость ньютоновской теории тяготения и специальной теории относительности

Главной особенностью специальной теории относительности является существование абсолютного барьера для скорости, устанавливаемого скоростью света. Важно понимать, что этот предел относится не только к материальным телам, но также к сигналам и воздействиям любого рода. Не существует способа передать информацию или возмущение из одного места в другое со скоростью, превышающей скорость света. Конечно, в природе есть масса способов распространения возмущений со скоростью, меньшей скорости света. Например, наша речь и другие звуки передаются с помощью колебаний, распространяющихся в воздухе со скоростью около 330 м/с, что ничтожно мало по сравнению со скоростью света, равной 300 000 км/с. Эта разница скоростей становится очевидной, если наблюдать за бейсбольным матчем с мест, расположенных далеко от поля. Когда подающий бьет по мячу, звук достигает вас спустя несколько мгновений после того, как вы увидели удар. Похожие вещи происходят во время грозы. Хотя вспышка молнии и удар грома происходят одновременно, мы видим молнию раньше, чем слышим гром. Это снова является отражением значительной разницы в скоростях света и звука. Успех специальной теории относительности говорит нам, что обратная ситуация, когда какой-нибудь сигнал достигнет нас раньше, чем свет, излученный одновременно с этим сигналом, попросту невозможна. Ничто в мире не может обогнать фотоны.

Здесь и лежит камень преткновения. В теории тяготения Ньютона одно тело притягивает другое с силой, которая зависит только от масс этих тел и расстояния между ними. Эта сила никак не зависит от того, насколько долго тела находились рядом друг с другом. Это означает, что если их массы или расстояния между ними изменятся, то тела, согласно Ньютону, немедленно почувствуют изменение взаимного гравитационного притяжения. Например, ньютоновская теория тяго-тения утверждает, что если Солнце внезапно взорвется, то Земля, расположенная на расстоянии примерно 150 млн км от него, мгновенно сойдет со своей обычной эллиптической орбиты. Несмотря на то, что вспышка света от взрыва дойдет от Солнца до Земли только через восемь минут, в теории Ньютона сведения о том, что Солнце взорвалось, будут переданы на Землю мгновенно, посредством внезапного изменения силы тяготения, управляющей движением планеты.

Этот вывод находится в прямом противоречии со специальной теорией относительности, поскольку последняя уверяет, что никакая информация не может быть передана со скоростью, превышающей скорость света. Мгновенное распространение тяготения в максимально возможной степени нарушает это принцип.

Таким образом, в начале XX в. Эйнштейн осознал, что невероятно успешная теория тяготения Ньютона находится в противоречии со специальной теорией относительности. Уверенный в истинности специальной теории относительности, Эйнштейн, невзирая на огромное количество экспериментальных данных, подтверждающих теорию Ньютона, стал работать над новой теорией гравитации, которая была бы совместима со специальной теорией относительности. Это, в конечном счете, привело его к открытию общей теории

относительности, в которой характер пространства и времени вновь претерпел поразительные изменения.

Самая счастливая идея Эйнштейна

Еще до открытия специальной теории относительности был ясен один существенный недостаток ньютоновской теории тяготения. Хотя теория чрезвычайно точно предсказывала движение тел под действием силы тяготения, она ничего не говорила о том, что представляет собой тяготение. Иными словами, как получается, что два тела, разделенные расстоянием в сотни миллионов километров и более, тем не менее, оказывают влияние на движение друг друга? Каким образом тяготение выполняет свою миссию? Сам Ньютон вполне осознавал существование этой проблемы. По его собственным словам «…непостижимо, чтобы неодушевленная, грубая материя могла без посредства чего-либо нематериального действовать и влиять на другую материю без взаимного соприкосновения, как это должно бы происходить, если бы тяготение в смысле Эпикура было существенным и врожденным в материи. Предполагать, что тяготение является существенным, неразрывным и врожденным свойством материи, так что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу, – это, по-моему, такой абсурд, который немыслим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах. Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенными законам. Является ли, однако, этот агент материальным или нематериальным, решать это я предоставил моим читателям»').

Это говорит о том, что Ньютон принимал существование тяготения, и разрабатывал уравнения, которые с высокой точностью описывают его действие, но никогда не предлагал никакого механизма, объясняющего, как оно работает. Он оставил миру «руководство пользователя» по гравитации с описанием того, как ее «использовать». Физики, астрономы и инженеры успешно применяли эти инструкции для прокладки курса ракет к Луне, Марсу и другим планетам Солнечной систем, для прогноза солнечных и лунных затмений, для предсказания движения комет и т. п. Но внутренний механизм – содержимое «черного ящика» гравитации – Ньютон оставил под покровом тайны. Когда вы пользуетесь плеером для компакт-дисков или персональным компьютером, вы обычно находитесь в таком же состоянии неведения об их внутреннем устройстве. Коль скоро вы знаете, как обращаться с исправным устройством, ни вам, ни кому-либо другому не требуется знать, каким образом оно выполняет ваши задания. Но когда ваш плеер или персональный компьютер выходит из строя, возможность его починки решающим образом зависит от знания его внутреннего устройства. Аналогично Эйнштейносознал, что, несмотря на сотни лет экспериментального подтверждения ньютоновской теории, специальная теория относительности обнаружила едва уловимую внутреннюю «неисправность», а устранение этой неисправности потребует решить вопрос об истинном механизме тяготения.

В 1907 г., обдумывая эти вопросы за своим столом в патентном бюро швейцарского города Берна, Эйнштейн сумел нащупать центральную идею, которая, после ряда успехов и неудач, в конечном счете привела его к радикально обновленной теории тяготения. Предложенный Эйнштейном подход не просто восполнил пробелы в ньютоновской теории, но совершенно изменил наши представления о тяготении, и, что очень важно, оказался полностью совместимым со специальной теорией относительности.

Подход, предложенный Эйнштейном, имеет отношение к вопросу, который беспокоил нас на всем протяжении главы 2. Там мы интересовались, как выглядит мир для двух наблюдателей, двигающихся относительно друг друга с постоянной скоростью. Тщательно сравнивая точки зрения этих двух наблюдателей, мы получили ряд удивительных выводов о сущности пространства и времени. А что можно сказать о наблюдателях, находящихся в состоянии ускоренного движения? Точки зрения этих наблюдателей труднее поддаются анализу, чем в случае наблюдателей, степенно движущихся с постоянной скоростью. Тем не

менее, можно поставить вопрос, существует ли способ разрешить эти трудности и осмыслить ускоренное движение в соответствие с новым уровнем понимания пространства и времени.

«Самая счастливая идея» Эйнштейна объясняет, как сделать это. Чтобы понять ее, вообразим, что сейчас 2050 г. и вы являетесь главным экспертом ФБР по взрывчатым веществам. К вам обращаются с отчаянной мольбой срочно исследовать объект, который, по-видимому, является бомбой изощренной конструкции, заложенной в самом центре Вашингтона. Поспешив на место действия и осмотрев бомбу, вы видите, что сбылись ваши самые худшие предчувствия – бомба является атомной и имеет такую мощность, что даже если поместить ее глубоко под землю или на дно океана, последствия от взрыва будут опустошительными. После внимательного изучения детонирующего устройства вы видите, что обезвредить его невозможно и, более того, оно содержит защиту нового типа. Бомба смонтирована на весах. Как только показания весов изменятся более чем на 50 % от того значения, которое они показывают сейчас, бомба взорвется. Изучив часовой механизм, вы видите, что в вашем распоряжении осталась всего неделя. От ваших действий зависит судьба миллионов людей – что же делать?

Итак, смирившись с тем, что на земле и под землей нет безопасного места, где можно было бы взорвать бомбу, вы приходите к выводу, что остается только один выход: необходимо запустить ее в космос, где взрыв не причинит ущерба никому. Вы высказываете эту идею на совещании вашей команды в ФБР, и почти немедленно молодой сотрудник перечеркивает этот план. «В вашем предложении есть серьезный изъян, – говорит ваш ассистент Исаак. – Когда устройство будет удаляться от Земли, его вес начнет уменьшаться, поскольку гравитационное притяжение со стороны Земли будет ослабевать. Это означает, что показания весов внутри устройства уменьшатся, что приведет к детонации задолго до того, как бомба удалится на безопасное расстояние». Прежде чем вы успеваете полностью осмыслить это возражение, в разговор вмешивается другой молодой человек. «На самом деле здесь есть еще одна проблема, которую нам следует обсудить, – заявляет ваш другой ассистент Альберт. – Она столь же важна, как та, на которую указал Исаак, но является более тонкой, поэтому следите внимательно за моим объяснением». Желая взять минуту на размышление, чтобы обдумать возражение Исаака, вы пытаетесь отмахнуться от Альберта, но если уж он начал говорить, остановить его невозможно.

«Для того чтобы запустить устройство в открытый космос, мы должны поместить его на ракету. Чтобы улететь в космическое пространство, ракета должна ускориться, поэтому показания на весах увеличатся, и взрыв снова произойдет преждевременно.Основание бомбы, которое стоит на весах, будет давить на весы сильнее, чем когда оно находится в покое. Это похоже на то, как ваше тело прижимается к сиденью автомобиля при разгоне. Бомба „вдавится" в весы точно так же, как ваша спина в спинку сидения. Под давлением показания весов увеличиваются, и это приведет к взрыву, как только увеличение превысит 50 %».

Вы благодарите Альберта за его комментарий, но мысленно откладываете его в сторону, поскольку по своим последствиям оно совпадает с замечанием Исаака, и безрадостно констатируете, что для того, чтобы убить идею, достаточно одного выстрела, и наблюдение Исаака, которое, несомненно, является правильным, уже сделало это. Без особой надежды вы спрашиваете, есть ли еще идеи. В этот момент Альберта посещает озарение. «Хотя, взвесив все еще раз, – продолжает он, – ваша идея вовсе не кажется мне безнадежной. Замечание Исаака о том, что сила тяжести уменьшается при подъеме в космическое пространство, означает, что показания весов будут уменьшаться. Мое наблюдение, состоящее в том, что ускорение ракеты при движении вверх заставит устройство давить на весы сильнее, означает, что показания весов будут увеличиваться. В итоге это означает, что в каждый момент следует поддерживать ускорение на таком уровне, чтобы эти два эффекта нейтрализовали друг друга! А именно, на ранних стадиях подъема, пока ракета ощущает полную мощь земного тяготения, она может ускоряться не очень сильно, так, чтобы оставаться в границах пятидесяти процентного допуска. По мере того, как ракета будет

удаляться все дальше от Земли, а сила ее притяжения будет ослабевать, мы должны увеличить ускорение для того, чтобы скомпенсировать это ослабление. Увеличение показаний весов из-за ускорения может быть сделано в точности равным уменьшению показаний из-за ослабления гравитационного притяжения. Это означает, что в действительности можно сделать так, чтобы показания весов совсем не менялись!»

Предложение Альберта начинает постепенно до вас доходить. «Иными словами – говорите вы, – ускорение может быть заменой тяготения. Мы можем имитировать действие силы тяжести правильно подобранным ускоренным движением».

«Совершенно верно», – подтверждает Альберт.

«Итак, – продолжаете вы, – мы можем запустить бомбу в космос и, соответствующим образом регулируя ускорение ракеты, гарантировать, что показания весов не изменятся и бомба не взорвется до тех пор, пока не удалится на безопасное расстояние от Земли». Таким образом, если вы заставите гравитацию и ускорение играть друг против друга, используя для этого возможности ракетной техники XXI в., то сможете избежать катастрофы.

Осознание глубокой связи между гравитацией и ускоренным движением представляет собой главное озарение, снизошедшее на Эйнштейна в один счастливый день в патентном бюро Берна. Хотя эксперимент с бомбой уже высветил суть этой идеи, она заслуживает того, чтобы перефразировать ее в терминах, использованных в главе 2. Для этого вспомним, что если мы находимся в закрытом вагоне, не имеющем окон и не испытывающем ускорения, то не существует способа, с помощью которого мы могли бы определить скорость своего движения. Купе внутри будет продолжать выглядеть совершенно одинаково, и любые эксперименты дадут вам тождественные результаты независимо от скорости движения. Более того, не имея внешних ориентиров для сравнения, вы даже не сможете определить, движетесь ли вы вообще. С другой стороны, если вы ускоряетесь, то даже если доступная вам область ограничена внутренностью купе, вы почувствуете силу, действующую на ваше тело. Например, если кресло, в котором вы сидите, обращено вперед по ходу движения и прикручено к полу вагона, вы почувствуете силу, с которой спинка кресла будет давить на вас, совсем как в примере, приведенном Альбертом. Аналогично, если купе испытывает ускорение, направленное вверх, вы почувствуете силу, действующую на ваши ноги со стороны пола. Идея Эйнштейна состояла в том, что, оставаясь в закрытом купе, вы не сможете определить, когда на вас действует ускорение, а когдасила тяготения; если их величины совпадают, сила, создаваемая ускоренным движением, и сила, возникающая под действием гравитационного поля, неразличимы. Если ваше купе неподвижно стоит на поверхности Земли, вы чувствуете привычную силу, действующую на ваши ноги со стороны пола; точно такими же будут ощущения, если вы ускоренно движетесь вверх. Это та самая эквивалентность, которую Альберт использовал для решения проблемы с запуском в космос оставленной террористами бомбы. Если вагон опрокинется, вы почувствуете со стороны спинки кресла силу (не дающую вам упасть), которая будет такой, как если бы вагон ускорялся в горизонтальном направлении. Эйнштейн назвал неразличимость ускоренного движения и гравитации принципом эквивалентности. Этот принцип составляет основу общей теории относительности2'.

Описание, приведенное выше, показывает, что общая теория относительности завершает работу, начатую специальной теорией относительности. Используя принцип относительности, специальная теория относительности провозглашает равноправие точек зрения наблюдателей: законы физики проявляются одинаковым образом для всех наблюдателей, находящихся в состоянии равномерного движения. Но это равноправие на самом деле является ограниченным, поскольку из него исключается огромное число точек зрения других наблюдателей, находящихся в состоянии ускоренного движения. Прозрение, пришедшее к Эйнштейну в 1907 г., показывает, как охватить все точки зрения – и тех, кто движется с постоянной скоростью, и тех, кто ускоряется, – в рамках одной изящной концепции. Поскольку нет различия между ускоренным пунктом наблюдения в отсутствии гравитационного поля и неускоренным пунктом наблюдения в присутствии гравитационного

поля, можно выбрать это последнее описание и провозгласить, что все наблюдатели, независимо от состояния движения, могут утверждать, что они неподвижны, а «остальная часть мира движется рядом с ними», если они подходящим образом введут гравитационное поле в описание своего окружения. В этом смысле, благодаря включению гравитации, общая теория относительности гарантирует нам, что все возможные точки зрения являются равноправными. (Как мы увидим ниже, это означает, что различия между наблюдателями в главе 2, которые были основаны на ускоренном движении – как в случае с Джорджем, устремившимся за Грейс, включив свой ранцевый двигатель, и постаревшим меньше, чем она – допускают эквивалентное описание без ускорения, но с гравитацией.)

Эта глубокая связь между гравитацией и ускоренным движением, несомненно, представляет собой блестящую догадку, но почему она сделала Эйнштейна столь счастливым? Причина, попросту говоря, состоит в том, что гравитация – загадочное явление. Это грандиозная сила, пронизывающая жизнь космиса, но она ускользающе непонятна. С другой стороны, ускоренное движение, хотя и является несколько более сложным, чем равномерное, является конкретным и вполне материальным. Эйнштейн понял, что, благодаря взаимосвязи между этими явлениями, он может использовать понимание ускоренного движения в качестве могучего инструмента для достижения такого же понимания гравитации. Претворить эту стратегию в жизнь было нелегко даже для такого гения, как Эйнштейн, но, в конечном счете, этот подход принес свои плоды в виде общей теории относительности. Чтобы достичь этого, Эйнштейну пришлось выковать второе звено цепи, объединяющей гравитацию и ускоренное движение, – кривизну пространства и времени, – к обсуждению которой мы сейчас перейдем.

Ускорение и искривление пространства и времени

Эйнштейн работал над проблемой гравитации с предельной, часто чрезмерной интенсивностью. Примерно через пять лет после счастливого озарения в бернском патентном бюро, он писал физику Арнольду Зоммерфельду: «Сейчас я работаю исключительно над проблемой гравитации… одно могу сказать определенно – никогда в моей жизния не изнурял себя так, как сейчас… по сравнению с этой проблемой первоначальная (т. е. специальная) теория относительности кажется детской забавой»3'.

Следующий ключевой прорыв, касающийся простого, но неочевидного следствия применения специальной теории относительности для установления связи между гравитацией и ускоренным движением, был сделан, по-видимому, в 1912 г. Чтобы понять этот шаг в исследованиях Эйнштейна, проще всего обратиться (так, вероятно, поступил и Эйнштейн) к конкретному примеру ускоренного движения4'. Вспомним, что объект считается ускоренно движущимся, если он изменяет скорость или направление своего движения. Для простоты ограничимся ускоренным движением, в котором скорость остается постоянной, а изменяется только направление движения тела. Конкретно рассмотрим движение по кругу, которое можно увидеть на аттракционе Верхом на торнадо. В этом аттракционе вы становитесь внутрь большого круга, по краю которого расположена стенка, изготовленная из плексигласа, прижимаетесь спиной к этой стенке, и круг начинает вращаться с большой скоростью. Как при всяком ускоренном движении (вы можете ощутить его), вы почувствуете, что ваше тело отбрасывается по радиусу от центра вращения, а круговая плексигласовая стенка вдавливается в вашу спину, не давая вам вылететь с круга. (На самом деле, хотя это не относится к нашему разговору, вращательное движение «прилепляет» ваше тело к плексигласу с такой силой, что когда планка, на которой вы стоите, уходит из-под ног, вы не падаете, а остаетесь прижатым к стенке.) Если движение плавное, и вы закроете глаза, давление, которое будет действовать на вашу спину в результате вращения, – совсем как давление со стороны матраса в постели – почти способно создать иллюзию, что вы лежите. Слово «почти» связано с тем фактом, что вы продолжаете испытывать действие обычной, «вертикальной» гравитации, которая не дает вашему мозгу

одурачить себя. Но если бы вам довелось кататься на этом аттракционе в открытом космосе, и если бы скорость вращения была соответствующей, вы бы почувствовали себя лежащим в обычной постели на Земле. Более того, если бы вы «встали» и попробовали бы прогуляться по внутренней поверхности вращающейся плексигласовой стенки, ваши ноги ощутили бы точно такое же давление, какое они испытывают на обычном полу. На самом деле, проекты космических станций предусматривают подобное вращение для создания искусственной силы тяжести в космическом пространстве.

Теперь, используя ускоренное движение во вращающемся аттракционе для имитации действия силы тяжести, можно, следуя Эйнштейну, посмотреть, как выглядят пространство и время для тех, кто находится на круге. Его рассуждения в приложении к нашей ситуации были бы такими. Мы, неподвижные наблюдатели, легко можем измерить длину окружности и радиус вращающегося круга. Например, чтобы измерить длину окружности, мы будем аккуратно прикладывать рулетку к ободу вращающегося круга; для измерения радиуса мы будем также аккуратно перемещать рулетку от оси вращения к внешнему краю круга. Как можно предположить, основываясь на школьном курсе геометрии, отношение эти двух величин будет равно 2? (около 6,28), в точности таким же, как для окружности, нарисованной на плоском листе бумаги. А как это будет выглядеть с точки зрения того, кто катается на этом аттракционе?

Чтобы узнать это, мы попросили Слима и Джима, которые как раз катаются на этом аттракционе, выполнить для нас несколько измерений. Мы бросили одну из наших рулеток Слиму, который отправился измерять длину окружности, а другую – Джиму, который будет измерять радиус. Чтобы увидеть все наилучшим образом, взглянем на круг с высоты птичьего полета, как показано на рис. 3.1. Мы снабдили снимок стрелками, показывающими мгновенное направление движения в каждой точке. Как только Слим начинает измерять длину окружности, нам, из положения сверху, сразу становится понятно, что он получит не то значение, которое получили мы. Когда он прикладывает рулетку к окружности, мы замечаем, что ее длина уменьшается.

Рис. 3.1. Линейка Слима укорачивается, так как она прикладывается вдоль направления движения круга. Линейка же Джима лежит вдоль радиуса круга, перпендикулярно направлению движения, и поэтому ее длина не уменьшается

Это не что иное, как обсуждавшееся в главе 2 лоренцево сокращение, которое связано с тем, что длина тела представляется уменьшившейся в направлении его движения. Уменьшение длины рулетки означает, что мы должны будем уложить ее, совмещая начало с концом, большее число раз, чтобы обойти весь круг. Так как Слим продолжает считать, что длина рулетки составляет один метр (поскольку между ним и его рулеткой нет относительного перемещения, он думает, что она имеет свою обычную длину в один метр), он измерит большую длину окружности, чем мы. (Если это кажется парадоксальным, вам может помочь примечание 5.)

Ну, а что насчет радиуса? Джим использует тот же метод определения радиуса, и нам, с высоты птичьего полета, видно, что он получит такое же значение, которое получили мы. Причина состоит в том, что его рулетка располагается не по мгновенному направлению движения круга (как было при измерении длины окружности). Она направлена под углом 90

градусов к направлению движения и поэтому не сокращается в направлении своей длины. Следовательно, Джим получит точно такое же значение величины радиуса, какое получили мы.

Но теперь, рассчитав отношение длины окружности колеса к его радиусу, Слим и Джим получат число, которое будет превышать полученное нами значение 2?, поскольку у них длина окружности оказалась больше, а радиус остался тем же самым. Что за чудеса? Как может быть, чтобы для какой-нибудь фигуры в форме окружности нарушалось установленное еще древними греками правило, согласно которому для любой окружности это отношение в точности равно 2??

Вот объяснение Эйнштейна. Результат древних греков справедлив для окружностей, нарисованных на плоской поверхности. Но подобно тому, как кривые зеркала в парке развлечений искажают нормальную пространственную структуру вашего отражения, так и пространственная форма окружности исказится, если она будет нарисована на искривленной или деформированной поверхности: отношение длины окружности к радиусу для такой окружности, как правило, не будет равно 2?.

В качестве примера на рис. 3.2 приведены три окружности одинакового радиуса. Длины этих окружностей различны. Длина окружности (б), нарисованной на искривленной поверхности сферы, меньше длины окружности (а), нарисованной на плоской поверхности, несмотря на то, что они имеют одинаковый радиус. Искривленный характер поверхности сферы приводит к тому, что радиальные линии, проведенные из центра, слегка сходятся друг к другу, приводя к небольшому уменьшению длины окружности.

Рис. 3.2. Окружность, нарисованная на поверхности сферы (б), имеет меньшую длину, чем окружность, нарисованная на плоском листе бумаги (о), а окружность, начерченная на седлообразной поверхности, будет иметь большую длину, несмотря на то, что все три имеют одинаковый радиус

Длина окружности (в), нарисованной на седловидной искривленной поверхности, больше, чем длина окружности, изображенной на плоской поверхности. Свойства кривизны седловидной поверхности приводятк тому, что радиальные линии слегка расходятся, вызывая небольшое увеличение длины окружности. Эти наблюдения показывают, что отношение длины окружности к радиусу для (б) будет меньше, чем 2?, а для (в) – больше, чем 2?. Но отклонения от значения 2?, особенно в сторону увеличения, как в примере (в), – это как раз то, что было обнаружено в случае вращающегося аттракциона. Подобные наблюдения привели Эйнштейна к идее, что нарушение «обычной», евклидовой геометрии объясняется кривизной пространства. Плоская геометрия древних греков, которой тысячи лет учат школьников, попросту не применима к объектам на вращающемся круге. Вместо этого здесь имеет место ее обобщение на случай искривленного пространства, схематически показанное на рис.3.2в 5).

Итак, Эйнштейн понял, что установленные древними греками привычные пространственные геометрические отношения, которые верны для «плоских» пространственных фигур, таких, как окружность на плоском столе, не выполняются с точки зрения наблюдателя, испытывающего ускорение. Конечно, мы рассмотрели здесь только один, конкретный вид ускоренного движения, но Эйнштейн показал, что аналогичный результат – искривление пространства – справедлив для всех случаев ускоренного движения.

В действительности, ускоренное движение приводит не только к искривлению пространства, но и к аналогичному искривлению времени. (Исторически Эйнштейн сначала сосредоточил внимание на кривизне времени, и только потом осознал важность кривизны пространства6'.) То, что время также подвергается искривлению, неудивительно – в главе 2 мы уже видели, что специальная теория относительности провозглашает союз пространства

и времени. Это слияние было подытожено поэтическими словами Минковского, который на лекции по специальной теории относительности в 1908 г. сказал: «Отныне пространство и время, рассматриваемые отдельно и независимо, обращаются в тени и только их соединение сохраняет самостоятельность»7). Пользуясь более приземленным, но столь же вольным языком, можно сказать, что сплетая пространство и время в единую ткань пространства-времени, специальная теория относительности провозглашает: «То, что истинно для пространства, то истинно и для времени». Однако здесь возникает вопрос. Мы можем представить себе искривленное пространство, зная, как искривлена его форма, но что мы имеем в виду, говоря о кривизне времени?

Для того чтобы нащупать ответ, еще раз посадим Слима и Джима на аттракцион и попросим их провести следующий эксперимент. Слим будет стоять на краю радиального отрезка спиной к кругу, а Джим будет медленно ползти к нему вдоль этого радиуса от центра круга. Через каждые несколько метров Джим будет останавливаться, и они будут сравнивать показания своих часов. Что они увидят? Наблюдая со своей позиции с высоты птичьего полета, мы снова сможем предсказать ответ. Их часы будут расходиться в показаниях. Мы пришли к этому выводу потому, что увидели, что Слим и Джим движутся с разной скоростью – при движении на аттракционе чем дальше от центра вы находитесь, тем большее расстояние должны пройти для того, чтобы совершить один оборот и, следовательно, тем быстрее вы движетесь. Но, согласно специальной теории относительности, чем быстрее вы движетесь, тем медленнее идут ваши часы – из этого мы заключаем, что часы Слима будут идти медленнее, чем часы Джима. Далее, Слим и Джим обнаружат, что по мере того как Джим будет приближаться к Слиму, его часы будут идти все медленнее, и скорость их хода будет становиться такой же, как у часов Слима. Это отражает тот факт, что по мере приближения Джима к краю круга, его скорость приближается к скорости Слима.

Мы приходим к выводу, что для наблюдателей на вращающемся круге, таких как Слим и Джим, скорость течения времени зависит от их положения – в нашем случае от их расстояния до центра круга. Это является иллюстрацией того, что мы понимаем под кривизной времени. Время искривлено, если скорость его хода изменяется от одной точки к другой. Важно подчеркнуть, что Джим заметит кое-что еще, когда будет ползти вдоль радиуса. Он почувствует возрастаю-щую силу, выталкивающую его с круга, поскольку не только скорость, но и ускорение увеличиваются по мере удаления от центра круга. Используя наш аттракцион, мы видим, что большее ускорение связано с более сильным замедлением хода часов, – т. е. большее ускорение приводит к более значительному искривлению времени.

Эти наблюдения дали возможность Эйнштейну сделать заключительный шаг. Поскольку он уже показал, что гравитацию и ускоренное движение нельзя по существу различить, и поскольку, как он показал теперь, ускоренное движение связано с искривлением пространства и времени, он сделал следующее предположение о внутреннем содержании «черного ящика» гравитации, механизме, с помощью которого действует гравитация. Согласно Эйнштейну, гравитация представляет собой искривление пространства и времени. Посмотрим, что это означает.

Основы общей теории относительности

Чтобы почувствовать, в чем суть нового представления о гравитации, рассмотрим типичную ситуацию, в которой планета типа нашей Земли вращается вокруг звезды, похожей на наше Солнце. В ньютоновской теории гравитации Солнце удерживает Землю на некоей неопределяемой «привязи», которая каким-то образом мгновенно преодолевает огромные расстояния в пространстве и захватывает Землю (аналогичным образом и Земля захватывает Солнце). Эйнштейн предложил новую концепцию того, что происходит. Нам будет удобнее обсуждать подход Эйнштейна, имея конкретную наглядную модель

пространства-времени, которой было бы удобно манипулировать. Для этого сделаем два упрощения. Во-первых, на какое-то время забудем о времени и сконцентрируемся исключительно на наглядной модели пространства. Позже мы вновь включим время в наше обсуждение. Во-вторых, для того, чтобы иметь возможность рисовать модели и размешать рисунки на страницах этой книги, мы часто будем использовать двумерные аналоги трехмерного пространства. Большинство выводов, которые мы получим, работая с моделями более низких размерностей, непосредственно применимо к физической трехмерной среде, поэтому более простые модели представляют собой прекрасные средства для объяснения и обучения.

Используя эти упрощения, мы изобразили на рис. 3.3 двумерную модель области нашей Вселенной.

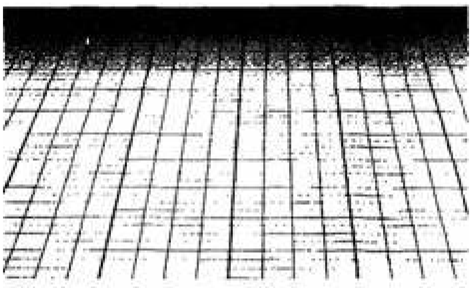

Рис. 3.3. Схематическое представление плоского пространства

Координатная сетка удобна для указания положения, точно так же, как сеть улиц позволяет описать местонахождение в городе. При задании адреса в городе, кроме положения на двумерной сетке улиц, указывается также положение по вертикали, например, указание этажа. Для облегчения визуального восприятия будем отбрасывать третье измерение в наших двумерных моделях.

Эйнштейн высказал предположение, что в отсутствие материи и энергии пространство будет плоским. На языке двумерных моделей это означает, что «форма» пространства должна быть плоской, подобно поверхности гладкого стола, как показано на рис. 3.3. Это изображение пространственной структуры нашей Вселенной, которое было общепринятым в течение тысяч лет. Но что произойдет с пространством, если в нем присутствует массивный объект, подобный Солнцу? До Эйнштейна ответом на этот вопрос было слово «ничего»: пространство (и время) считались инертной средой, сценой, на которой события в жизни Вселенной развивались сами по себе. Однако цепочка рассуждений Эйнштейна, которую мы рассмотрели выше, приводит к другому выводу.

Массивное тело, подобно нашему Солнцу, а на самом деле любое тело, оказывает гравитационное воздействие на другие тела. В примере с бомбой террориста мы установили, что действие гравитационных сил неотличимо от действия ускоренного движения. Пример с аттракционом Верхом на торнадо показал, что математическое описание ускоренного движения требует введения искривленного пространства. Эта связь между гравитацией, ускоренным движением и кривизной пространства привела Эйнштейна к блестящей догадке: присутствие массивного тела, подобного нашему Солнцу, приводит к тому, что структура пространства вокруг этого тела искривляется, как показано на рис. 3.4.

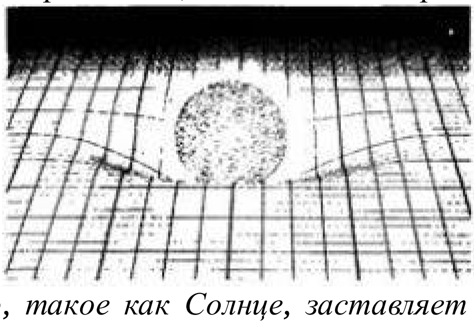

Рис. 3.4. Массивное тело, такое как Солнце, заставляет структуру пространства искривляться подобно тому, как деформируется резиновая пленка, если на нее положить шар для боулинга.

Полезная и часто используемая аналогия состоит в том, что структура пространства деформируется в присутствии массивных тел, таких как наше Солнце, подобно резиновой пленке, на которую положили шар для боулинга.

Согласно этой радикальной гипотезе, пространство не является просто пассивной ареной событий во Вселенной; форма пространства изменяется под влиянием присутствующих в нем тел.

Это искривление, в свою очередь, влияет на другие тела, движущиеся вблизи Солнца, которые теперь будут перемещаться по деформированному пространству. Используя аналогию с резиновой пленкой и шаром для боулинга, можно сказать, что если мы поместим на пленку шарик и придадим ему начальную скорость, его траектория будет зависеть от того, присутствует ли в центре пленки массивный шар для боулинга. Если шара для боулинга там нет, резиновая пленка будет плоской, и шарик будет двигаться по прямой. Если шар для боулинга присутствует, он будет искривлять пленку, и шарик будет двигаться по искривленной траектории. Если мы придадим шарику соответствующую скорость и направим его в соответствующем направлении, он будет совершать периодическое движение вокруг шара для боулинга (если игнорировать действие сил трения), т.е. фактически «выйдет на орбиту». Наш язык способствует применению этой аналогии к гравитации.

Солнце, подобно шару для боулинга, искривляет структуру окружающего его пространства, а движение Земли, как и движение шарика, определяется этой кривизной. Если скорость и направление движения Земли имеют подходящие значения, она, подобно шарику, будет вращаться вокруг Солнца. Это влияние кривизны на движение Земли, показанное на рис. 3.5, и есть то, что мы обычно называем гравитационным воздействием Солнца.

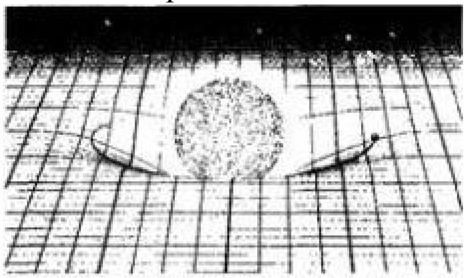

Рис. 3.5. Земля остается на орбите вокруг Солнца потому, что катится по ложбине в искривленной структуре пространства. Говоря более точно, она следует «линии наименьшего сопротивления» в деформированной окрестности Солнца.

Разница состоит в том, что в отличие от Ньютона Эйнштейн указал механизм, с помощью которого действует гравитация. Этим механизмом является кривизна пространства. С позиций Эйнштейна, гравитационная привязь, удерживающая Землю на орбите, не связана с каким-то мистическим мгновенным воздействием, оказывае-мым Солнцем; на самом деле это кривизна структуры пространства, вызванная присутствием Солнца.

Такая картина позволяет по-новому взглянуть на две лажные особенности гравитации. Во-первых, чем массивнее будет шар для боулинга, тем сильнее он будет деформировать пленку. Так же и в эйнштейновской модели гравитации – чем массивнее объект, тем более сильно он искривляет окружающее пространство. Это означает, в точном соответствии с экспериментальными фактами, что чем массивнее объект, тем сильнее его гравитационное воздействие на другие тела. Во-вторых, так же как деформация резиновой пленки, вызванная шаром для боулинга, становится все меньше по мере удаления от шара, так и кривизна пространства, созданная присутствием массивного тела, уменьшается при увеличении расстояния от него. Это опять же согласуется с нашим пониманием гравитации, которая ослабевает при увеличении расстояния между объектами.

Здесь важно помнить, что шарик сам искривляет резиновую пленку, хотя и слабо. Земля, которая сама является массивным телом, тоже искривляет пространство, хотя и в гораздо меньшей степени, чем Солнце. Это объясняет с позиций общей теории относительности то, почему Земля удерживает на орбите Луну, а также не дает нам с вами

улететь в космическое пространство. Когда парашютист совершает свой прыжок, он скользит вниз по впадине в пространстве, образовавшейся под действием массы Земли. Более того, каждый из нас, как и любое массивное тело, также искривляет пространство вблизи своего тела, хотя из-за относительной малости массы человеческого тела эти впадины очень малы.

В заключение заметим, что Эйнштейн был полностью согласен с утверждением Ньютона: «Гравитация должна передаваться каким-то посредником», и принял вызов Ньютона, который оставил определение этого посредника «на усмотрение моих читателей». Согласно Эйнштейну, посредником гравитации является структура пространства.

Некоторые замечания

Аналогия с резиновой пленкой и шаром для боулинга полезна, поскольку она дает наглядный образ, с помощью которого можно реально понять, что означает искривление пространственной структуры Вселенной. Физики часто используют эту и другие подобные ей аналогии для выработки интуитивных представлений о гравитации и кривизне. пространства. Однако, несмотря на полезность, аналогия с резиновой пленкой и шаром для боулинга несовершенна, и мы хотим для полной ясности привлечь внимание читателя к некоторым ее недостаткам.

Во-первых, когда Солнце вызывает искривление структуры пространства, это не связано с тем, что оно «тянет пространство вниз» в результате действия силы тяжести, как это происходит в случае с шаром для боулинга. В случае с Солнцем здесь нет других объектов, которые «тянут пространство». Напротив, как учит Эйнштейн, кривизна пространства и есть тяготение. Пространство реагирует искривлением на присутствие объекта, имеющего массу. Аналогично, Земля остается на орбите не потому, что гравитационное притяжение какого-то другого внешнего тела направляет ее по ложбине в искривленной структуре пространства, как это происходит с шариком на искривленной резиновой пленке. Как показал Эйнштейн, тела движутся в пространстве (или, точнее, в пространстве-времени) по кратчайшим возможным путям – «по наиболее легким путям» или, иными словами, «по путям наименьшего сопротивления». Если пространство искривлено, такие пути тоже будут искривленными. Таким образом, хотя модель, состоящая из резиновой пленки и шара для боулинга, дает хорошую наглядную аналогию, показывающую, как объекты, подобные Солнцу, искривляют пространство вокруг себя и тем самым оказывают влияние на движение других тел, физический механизм этих деформаций совершенно иной. Модель обращается к нашей интуиции в рамках традиционных ньютоновских представлений, тогда как для объяснения механизма используется понятие кривизны пространства. Второй недостаток этой аналогии связан с тем, что пленка является двумерной. На самом деле Солнце (как и все другие массивные тела) искривляют окружающее их трехмерное пространство, но это труднее наглядно представить. На рис. 3.6 сделана попытка изобразить это. Все пространство, окружающее Солнце, «снизу», «с боков» и «сверху» подвергается деформации, и на рис. 3.6 схематически показана часть такого искривленного пространства.

Рис. 3.6. Пример искривленного трехмерного пространства, окружающего Солнце.

Тело, подобное Земле, движется сквозь трехмерное пространство, искривленное в результате присутствия Солнца. При взгляде на рисунок у вас могут возникнуть вопросы, – например, почему Земля не ударяется о «вертикальную часть» показанного на нем искривленного пространства? Следует, однако, иметь в виду, что пространство, в отличие от резиновой пленки, не образует сплошного барьера. Криволинейная сетка, показанная на рисунке, представляет собой всего лишь набор сечений трехмерного искривленного пространства, в которое Земля, мы с вами и все остальное погружены, и в котором все это свободно движется. Возможно, вам покажется, что это еще более усложняет картину; у вас может возникнуть вопрос: почему мы не ощущаем пространства, если погружены в его структуру? Но мы ощущаем его. Мы ощущаем силу тяжести, а пространство представляет собой среду, которая передает гравитационное воздействие. Выдающийся физик Джон Уилер часто говорил, описывая гравитацию, что «масса управляет пространством, говоря ему, как искривляться, а пространство управляет массой, говоря ей, как двигаться»8'.

Третьим недостатком этой аналогии является то, что мы игнорировали временное измерение. Мы сделали это для большей наглядности: хотя специальная теория относительности и провозглашает, что мы должны рассматривать временное измерение наравне с пространственными, «увидеть» время значительно сложнее. Однако, как видно из примера с аттракционом Верхом на торнадо, ускорение и, следовательно, гравитация, искривляют и пространство, и время. (В действительности, использование математического аппарата общей теории относительности показывает, что при относительно медленном движении тел, например, при вращении планеты вокруг обычной звезды, подобной Солнцу, искривление времени на самом деле оказывает гораздо меньшее влияние на движение планеты, чем искривление пространства.) Мы вернемся к обсуждению искривления времени позже.

Если вы будете помнить об этих трех важных замечаниях, то использование наглядной модели, состоящей из резиновой пленки и шара для боулинга, в качестве интуитивного обобщения предложенного Эйнштейном нового взгляда на гравитацию, является вполне приемлемым.

Разрешение противоречия

Введя пространство и время в качестве динамических объектов, Эйнштейн создал ясный концептуальный образ того, как устроено тяготение. Главная проблема, однако, состоит в том, разрешает ли новая формулировка гравитационного взаимодействия то противоречие со специальной теорией относительности, которым страдала теория тяготения Ньютона. Да, разрешает. И снова аналогия с резиновой пленкой поможет понять основную идею. Представим себе, что у нас есть шарик, который катится по прямой линии по поверхности плоской пленки в отсутствие шара для боулинга. Если поместить шар для боулинга на пленку, движение шарика изменится, но не мгновенно. Если бы мы сняли эту последовательность событий на видеопленку и просмотрели ее в замедленном темпе, мы бы увидели, что возмущение, вызванное появлением шара для боулинга, распространяется подобно волнам в пруду и, в конце концов, достигает места, в котором находится шарик. Спустя короткое время переходные колебания резиновой пленки затухнут, и она перейдет в стационарное искривленное состояние.

То же самое справедливо и для структуры пространства. При отсутствии масс пространство является плоским, и небольшое тело будет находиться в состоянии безмятежного покоя или двигаться с постоянной скоростью. Когда на сцене появляется большая масса, пространство искривляется, – но, как и в случае с пленкой, деформация не будет мгновенной. Она будет распространяться в стороны от массивного тела и, в конце концов, придет в установившееся состояние, передающее гравитационное притяжение нового тела. В нашей аналогии возмущение распространяется по резиновой пленке со скоростью, зависящей от характеристик материала, из которого изготовлена пленка.

Эйнштейн сумел рассчитать скорость, с которой распространяется возмущение структуры Вселенной в реальных условиях. Оказалось, что она в точности равна скорости света. Это означает, например, что в рассмотренном выше гипотетическом примере, когда гибель Солнца оказывает влияние на судьбу Земли ввиду изменения их взаимного гравитационного притяжения, это влияние не будет мгновенным. Когда тело изменяет свое положение или даже взрывается, оно вызывает изменение в деформированном состоянии структуры пространства-времени, которое распространяется во все стороны со скоростью света, в полном соответствии с устанавливаемым специальной теорией относительности пределом для космических скоростей. Таким образом, мы на Земле увидим гибель Солнца в тот самый момент, когда ощутим изменения гравитационного притяжения спустя примерно восемь минут после взрыва Солнца. Тем самым формулировка Эйнштейна разрешает конфликт – гравитационные возмущения не отстают от фотонов, но и не опережают их.

Снова об искривлении времени

Картинки, которые мы видим на рис. 3.2, 3.4 и 3.6, иллюстрируют сущность того, что означает «искривленное пространство». Кривизна деформирует форму пространства. Физики пытались создать аналогичные образы для того, чтобы продемонстрировать смысл «искривленного времени», но они оказались гораздо сложнее для восприятия, поэтому мы не будем их здесь приводить. Вместо этого последуем примеру Слима и Джима из аттракциона Верхом на торнадо и попытаемся осознать ощущение искривленности времени, обусловленной гравитацией.

Для этого снова посетим Джорджа и Грейс, которые находятся уже не во мраке пустого космического пространства, а где-то на окраине Солнечной системы. Оба они все еще носят на своих скафандрах большие цифровые часы, которые мы когда-то синхронизировали. Для простоты не станем учитывать влияние планет и будем рассматривать только гравитационное поле Солнца. Далее, представим себе, что космический корабль, зависший около Джорджа и Грейс, размотал длинный трос, конец которого достигает окрестностей солнечной поверхности. С помощью этого троса Джордж медленно перебирается ближе к Солнцу. По пути он периодически останавливается, чтобы сравнить темп хода времени на его часах и на часах Грейс. Искривление времени, предсказываемое общей теорией относительности Эйнштейна, означает, что по мере того, как он будет испытывать все более сильное воздействие гравитационного поля, его часы будут все больше отставать от часов Грейс. Иными словами, чем ближе он будет к Солнцу, тем медленнее будут идти его часы. Именно в этом смысле гравитация деформирует не только пространство, но и время.

Вы должны были заметить, что в отличие от случая, рассмотренного в главе 2, когда Джордж и Грейс находились в пустом пространстве, перемещаясь относительно друг друга с постоянной скоростью, сейчас междуними нет симметрии. Джордж, в отличие от Грейс, ощущает, что сила тяжести становится все сильнее – ему приходится держаться за трос все крепче, чтобы не дать Солнцу притянуть себя. Оба согласны с тем, что часы Джорджа идут медленнее. Их точки зрения уже не являются «одинаково равноправными», что позволяло им обмениваться ролями и менять выводы на противоположные. На самом деле, ситуация схожа с той, с которой мы столкнулись в главе 2, когда Джордж испытал ускорение, включив ранцевый двигатель для того, чтобы догнать Грейс. Тогда ускорение Джорджа привело к тому, что его часы определенно стали идти медленнее, чем часы Грейс. Поскольку теперь мы знаем, что ощущение ускоренного движения совпадает с ощущением воздействия гравитационной силы, в теперешнем положении Джорджа, перебирающегося по тросу, действует тот же самый принцип, и мы снова видим, что часы Джорджа и все события в его жизни замедляются по сравнению с ходом времени у Грейс.

В гравитационном поле, подобном тому, которое существует на поверхности рядовой звезды вроде нашего Солнца, замедление темпа хода часов будет небольшим. Если Грейс находится на расстоянии миллиарда километров от Солнца, то когда Джордж будет в

нескольких километрах от поверхности нашего светила, темп хода его часов составит примерно 99,9998 % темпа хода часов Грейс. Такое замедление очень мало9). Однако если Джордж будет спускаться по тросу, который висит над поверхностью нейтронной звезды, масса которой примерно равна массе Солнца, а плотность вещества превышает солнечную примерно в миллион миллиардов раз, сильное гравитационное поле этой звезды замедлит темп хода его часов до 76 % темпа хода часов Грейс. Еще более сильные гравитационные поля, подобные тем, которые имеют место на внешней поверхности черных дыр (они обсуждаются ниже), могут замедлить ход времени еще сильнее. Более сильные гравитационные поля вызывают более сильное искривление времени.

Экспериментальное подтверждение общей теории относительности

Большинство из тех, кому приходится изучать общую теорию относительности, бывают очарованы ее эстетической привлекательностью. Путем замены холодного, механистического взгляда Ньютона на пространство, время и тяготение на динамическое и геометрическое описание, включающее искривленное пространство-время, Эйнштейн сумел «вплести» тяготение в фундаментальную структуру Вселенной. Перестав быть структурой, наложенной дополнительно, гравитация стала неотъемлемой частью Вселенной на ее наиболее фундаментальном уровне. Вдохнув жизнь в пространство и время, позволив им искривляться, деформироваться и покрываться рябью, мы получили то, что обычно называется тяготением.

Если оставить в стороне эстетическое совершенство, конечным подтверждением справедливости физической теории является ее способность объяснять и точно предсказывать физические явления. Теория гравитации Ньютона блестяще выдерживала это испытание с момента ее появления в конце XVII в. и до начала XX столетия. Применительно к подбрасываемым в воздух мячам, телам, падающим с наклонных башен, кометам, кружащимся вокруг Солнца, или планетам, вращающимся по своим орбитам, теория Ньютона всегда давала чрезвычайно точное объяснение всем наблюдениям и предсказаниям, которые бесчисленное количество раз проверялись в самых разных условиях. Как мы уже подчеркивали, причины появления сомнений в этой необычайно успешной с экспериментальной точки зрения теории состояли в том, что согласно ей гравитационное взаимодействие передается мгновенно, а это противоречит специальной теории относительности.

Эффекты специальной теории относительности, имея огромное значение для понимания пространства, времени и движения на самом фундаментальном уровне, остаются чрезвычайно малыми в мире малых скоростей, в котором мы обитаем. Аналогично,расхождения между общей теорией относительности Эйнштейна – теорией гравитации, совместимой со специальной теорией относительности, – и теорией тяготения Ньютона также чрезвычайно малы в большинстве обычных ситуаций. Это и хорошо, и плохо. Хорошо потому, что любая теория, претендующая на то, чтобы занять место теории тяготения Ньютона, должна полностью согласовываться с ней в тех областях, где теория Ньютона получила экспериментальное подтверждение. Плохо потому, что это затрудняет экспериментальный выбор между двумя теориями. Выявление различий между теориями Эйнштейна и Ньютона требует проведения чрезвычайно точных измерений в экспериментах, которые очень чувствительны к различиям этих двух теорий. Если вы бросите бейсбольный мячик, для предсказания места его приземления могут быть использованы и ньютоновская, и эйнштейновская теории гравитации. Ответы будут разными, но различия будут столь малы, что они лежат за пределами наших возможностей их экспериментального подтверждения. Требуются более тонкие эксперименты, и Эйнштейн предложил один из них10).

Мы любуемся звездами по ночам, но они, конечно, остаются на небе и днем. В это время мы обычно не видим их, потому что их далекие, точечные огни затмеваются светом

Солнца. Однако во время солнечных затмений Луна временно заслоняет часть света, идущего си Солнца, и удаленные звезды становятся видимыми и днем. Тем не менее, присутствие Солнца продолжает оказывать влияние на испущенный ими свет. Свет от некоторых отдаленных звезд на своем пути к Земле должен пройти вблизи Солнца. Общая теория относительности Эйнштейна утверждает, что Солнце искривляет пространство и время, и что эта деформация оказывает влияние на траекторию идущего от звезд света. В конце концов, фотоны, излученные далекими звездами, путешествуют по Вселенной, и если ее структура искривлена, это окажет влияние на движение фотонов, также как и на движение любого материального тела. Искривление траектории будет максимальным для тех лучей, которые проходят вблизи поверхности Солнца на своем пути к Земле. Такие лучи обычно полностью затмеваются светом Солнца, но во время солнечных затмений их можно увидеть.

Угол, на который отклоняется луч света, несложно измерить. Отклонение траектории луча приводит к смещению видимого положения звезды. Это смещение может быть точно измерено путем сравнения видимого положения звезды по сравнению с ее истинным положением, известным по результатам ночных наблюдений звезды (в отсутствие отклоняющего влияния Солнца), полученным с интервалом примерно в полгода до или после затмения, когда Земля находится в соответствующем положении. В ноябре 1915 г. Эйнштейн, используя разработанную им новую теорию гравитации для расчета угла, на который должен отклониться луч света от звезды, прошедший рядом с поверхностью Солнца, получил значение 0,00049 градуса (1,75 угловых секунд, где одна угловая секунда равна 1/3 600 градуса). Этот крошечный угол равен углу раствора диафрагмы, сфокусированной на двадцатипятицентовой монетке в трех километрах от нее. Однако измерение столь малого угла было уже под силу технике тех дней. По просьбе сэра Фрэнка Дайсона, директора Гринвичской обсерватории, сэр Артур Эддингтон, известный астроном и секретарь Королевского астрономического общества Англии, организовал экспедицию на остров Принсипе, расположенный у западного побережья Африки, для проверки предсказания Эйнштейна в ходе солнечного затмения, которое должно было произойти 29 мая 1919 г.

6 ноября 1919 г., после пяти месяцев анализа фотографий, сделанных во время затмения на о. Принсипе (а также фотографий того же затмения, сделанных в Собрале в Бразилии второй британской экспедицией, возглавляемой Чарльзом Дэвидсоном и Эндрю Кроммелином), на совместном заседании Королевского научного общества и Королевского астрономического общества было объявлено, что предсказания, сделанные Эйнштейном на основе общей теории относительности, подтвердились. За короткое время весть об этом успехе – революционном пересмотре ранее существовавших понятий пространства и времени – вышладалеко за пределы научного сообщества, сделав Эйнштейна знаменитым во всем мире. 7 ноября 1919 г. заголовок лондонской Таймс сообщал: «Революция в науке! Новая теория мироздания! Идеи Ньютона низвергнуты!»11). Это было звездным часом Эйнштейна.

За годы, прошедшие со времени этого эксперимента, подтверждение общей теории относительности, сделанное Эддингтоном, неоднократно подвергалось критическому анализу. Многочисленные сложности и тонкости, связанные с измерениями, затрудняют их воспроизведение и ставят под вопрос достоверность первоначальных результатов. Однако за последние 40 лет были выполнены разнообразные эксперименты с использованием последних достижений современной техники. Эти эксперименты предназначались для проверки различных аспектов общей теории относительности. Все предсказания общей теории относительности получили подтверждение. Сегодня не существует сомнений, что модель гравитации, предложенная Эйнштейном, не только совместима со специальной теорией относительности, но и дает более точное совпадение с экспериментальными данными, чем теория Ньютона.

Черные дыры, Большой взрыв и расширение Вселенной

Если эффекты специальной теории относительности становятся наиболее очевидными при больших скоростях движения тел, то общая теория относительности выходит на сцену, когда тела имеют очень большую массу и вызывают сильное искривление пространства и времени. Рассмотрим два примера.

Первым из них является открытие, сделанное во время Первой мировой войны немецким астрономом Карлом Шварцшильдом, когда он, находясь в 1916 г. на русском фронте, в перерывах между расчетом траекторий артиллерийских снарядов знакомился с достижениями Эйнштейна в области гравитации. Удивительно, что спустя всего несколько месяцев после того, как Эйнштейн нанес завершающие мазки на полотно обшей теории относительности, Шварцшильд сумел, используя эту теорию, получить полную и точную картину того, как искривляются пространство и время в окрестности идеально сферической звезды. Шварцшильд послал полученные им результаты с русского фронта Эйнштейну, который по его поручению представил их Прусской академии.

Помимо подтверждения и математически точного расчета искривления, которое мы схематически показали на рис. 3.5, работа Шварцшильда – известная в настоящее время под названием «решения Шварцшильда» – выявила одно поразительное следствие общей теории относительности. Было показано, что если масса звезды сосредоточена в пределах достаточно малой сферической области (когда отношение массы звезды к ее радиусу не превосходит некоторого критического значения), то результирующее искривление пространства-времени будет столь значительным, что никакой объект (включая свет), достаточно приблизившийся к звезде, не сможет ускользнуть из этой гравитационной ловушки. Поскольку даже свет не сможет вырваться из таких «сжатых звезд», первоначально они получили название темных, или замороженных, звезд.(Это название принадлежит советским ученым Я. Б. Зельдовичу и И. Д. Новикову. – Прим. ред) Более броское название было предложено годы спустя Джоном Уилером, который назвал их черными дырами – черными, потому что они не могут излучать свет, и дырами, потому что любой объект, приблизившийся к ним на слишком малое расстояние, никогда не возвращается назад. Это название прочно закрепилось и устоялось.

Решение Шварцшильда иллюстрируется на рис. 3.7. Хотя черные дыры известны своей «прожорливостью», тела, которые проходят мимо них на безопасном расстоянии, отклоняются точно так же, как они отклонились бы под действием обычной звезды, и следуют дальше своей дорогой. Но тела любой природы, подошедшие слишком близко, ближе, чем на расстояние, которое называется горизонтом событий черной дыры, приговорены – они будут неуклонно падать к центру черной дыры, подвергаясь действию все более интенсивных и становя щихся, в конце концов, разрушительными гравитационных деформаций.

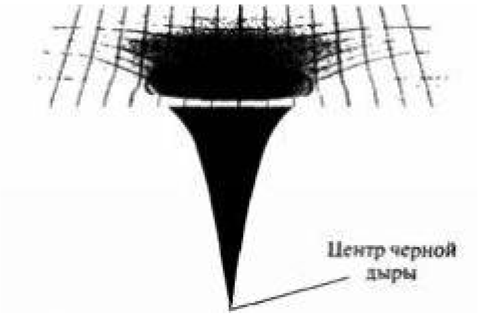

Рис. 3.7. Черная дыра искривляет структуру окружающего пространства-времени настолько сильно, что любой объект, пересекающий ее «горизонт событий» – обозначенный черной окружностью – не может ускользнуть из ее гравитационной ловушки. Никто не знает в точности, что происходит в глубинах черных дыр.

Если, например, вы подплываете к центру черной дыры ногами вперед, то при пересечении горизонта событий вы будете ощущать растущее чувство дискомфорта. Гравитационное притяжение черной дыры возрастет столь значительно, что оно будет

притягивать ваши ноги гораздо сильнее, чем голову (ведь ноги будут несколько ближе к центру черной дыры, чем голова), настолько сильно, что сможет быстро разорвать ваше тело на куски.

Если же вы будете благоразумнее в странствиях в окрестностях черной дыры и позаботитесь о том, чтобы не пересекать ее горизонт событий, то можно использовать черную дыру для замечательного трюка. Представим, например, что вы обнаружили черную дыру, масса которой в 1000 раз превышает массу Солнца, и спускаетесь на тросе, точно так же, как Джордж спускался на Солнце, до высоты 3 см над горизонтом событий. Как мы уже отмечали, гравитационные поля вызывают искривление времени, это означает, что ваше путешествие во времени замедлится. В действительности, поскольку черные дыры имеют столь сильные гравитационные поля, ход вашего времени замедлится очень сильно. Ваши часы будут идти примерно в десять тысяч раз медленнее, чем часы вашего друга, оставшегося на Земле. Если вы провисите над горизонтом событий черной дыры в таком положении один год, а потом вскарабкаетесь по тросу назад на ожидающий вас неподалеку космический корабль для короткого, но приятного путешествия домой, то по возвращении вы обнаружите, что с момента вашего отбытия прошло более десяти тысяч лет. Вы можете использовать черную дыру в качестве своего рода машины времени, которая позволит вам попасть в отдаленное будущее Земли.

Чтобы почувствовать всю грандиозность масштабов этих явлений, отметим, что звезда массой, равной массе Солнца, станет черной дырой, если ее радиус будет составлять не наблюдаемое значение (около 700 000 км), а всего лишь около 3 км. Вообразите, что все наше Солнце сжалось до размеров Манхэттена. Чайная ложка вещества такого сжатого Солнца будет весить столько же, сколько гора Эверест. Чтобы сделать черной дырой нашу Землю, мы должны сжать ее в шарик радиусом менее сантиметра. В течение долгого времени физики скептически относились к возможности существования таких экстремальных состояний материи, многие из них считали, что черные дыры являются всего лишь издержками разгулявшегося воображения перетрудившихся теоретиков.

Однако в течение последнего десятилетия накопилось достаточно много наблюдательных данных, подтверждающих существование черных дыр. Конечно, поскольку они являются черными, их нельзя наблюдать непосредственно, исследуя небосвод с помощью телескопа. Вместо этого астрономы пытаются обнаружить черные дыры по аномальному поведению обычных излучающих свет звезд, расположенных поблизости от горизонтов событий черных дыр. Например, когда частицы пыли и газа из внешних слоев находящихся по соседству с черной дырой обычных звезд устремляются в направлении горизонта событий черной дыры, они разгоняются почти до световой скорости. При таких скоростях трение в газопылевом водовороте засасываемого вещества приводит к выделению огромного количества тепла, заставляющего газопылевую смесь светиться, излучая обычный видимый свет и рентгеновское излучение. Поскольку это излучение генерируется вне горизонта событий,оно может избежать попадания в черную дыру. Это излучение распространяется в пространстве, оно может непосредственно наблюдаться и изучаться. Общая теория относительности детально предсказывает характеристики такого рентгеновского излучения; наблюдение этих предсказанных характеристик дает убедительные, хотя и косвенные подтверждения существования черных дыр. Например, имеется все больше свидетельств в пользу того, что очень массивная черная дыра, масса которой в два с половиной миллиона раз превосходит массу нашего Солнца, расположена в центре нашей Галактики. Но даже эти прожорливые черные дыры бледнеют по сравнению с теми, которые, по-мнению астрономов, расположены в центрах рассеянных по всему космосу сияющих ошеломляюще ярким светом квазаров. Это черные дыры, массы которых в миллиарды раз превосходят массу Солнца.

Шварцшильд умер всего через несколько месяцев после того, как нашел свое решение. Он умер от кожного заболевания, которым заразился на русском фронте. Ему было 42 года. Его трагически краткое знакомство с теорией гравитации Эйнштейна открыло одну из

наиболее ярких и таинственных граней жизни Вселенной.

Второй пример, который позволил общей теории относительности нарастить мускулы, относится к возникновению и эволюции всей Вселенной. Как мы уже видели, Эйнштейн показал, что пространство и время реагируют на присутствие массы и энергии. Эта деформация пространства-времени оказывает влияние на движение других космических тел, оказавшихся поблизости от образовавшегося искривления. Точная траектория движения этих тел зависит от их собственных массы и энергии, которые, в свою очередь, оказывают влияние на кривизну пространства-времени, влияющую на движение этих тел, и так до бесконечности. Используя уравнения общей теории относительности, основанные на достижениях в описании геометрии искривленного пространства, которых добился великий математик XIX в. Георг Бернхард Риман (подробнее мы расскажем о нем ниже), Эйнштейн сумел количественно описать взаимную эволюцию пространства, времени и материи. К его великому изумлению, применение этих уравнений не к изолированной системе (такой, как планета или комета, обращающаяся вокруг Солнца), а к Вселенной в целом, привело к поразительному выводу: общий пространственный размер Вселенной должен изменяться с течением времени. Иными словами, Вселенная либо расширяется, либо сжимается, но никогда не остается в неизменном состоянии. И это явственно следовало их уравнений общей теории относительности.

Это было слишком даже для Эйнштейна. Такой вывод опрокидывал общепринятые интуитивные представления о сущности пространства и времени, сформировавшиеся в течение тысяч лет под влиянием повседневного опыта. Даже такой радикальный мыслитель не смог отказаться от представлений о вечно существующей и неизменной Вселенной. По этой причине Эйнштейн пересмотрел свои уравнения и модифицировал их, добавив дополнительный член, ставший известным как космологическая постоянная, который позволял избежать такого вывода и возвращал нас в комфортные условия статической Вселенной. Однако 12 лет спустя, проводя тщательные наблюдения за отдаленными галактиками, американский астроном Эдвин Хаббл экспериментально установил, что Вселенная расширяется. История, закрепленная ныне в анналах науки, свидетельствует о том, что Эйнштейн вернул первоначальную форму своим уравнениям, признав их временную модификацию величайшим заблуждением в своей жизни 12). Теория Эйнштейна предсказывает расширение Вселенной, вопреки первоначальному нежеланию ее автора принять этот вывод. На самом деле, в начале 1920-х гг., за несколько лет до наблюдений Хаббла, русский метеоролог Александр Фридман, используя уравнения Эйнштейна, детально продемонстрировал, что все галактики переносятся в субстрате расширяющегося пространства, быстро удаляясь друг от друга. Наблюдения Хаббла и многочисленные данные, накопленные впоследствии, полностью подтвердили это потрясающее следствие общей теории относительности. Предложив объясне-ние расширения Вселенной, Эйнштейн совершил один из величайших интеллектуальных подвигов всех времен.

Если принять, что пространство Вселенной расширяется, приводя к увеличению расстояния между галактиками, переносимыми космическими потоками, можно мысленно обратить развитие Вселенной вспять по времени, чтобы исследовать ее происхождение. При таком обращении пространство Вселенной сокращается, и галактики становятся все ближе и ближе друг к другу. По мере того, как сокращающаяся Вселенная сжимает галактики, в ней, как в автоклаве, происходит резкое увеличение температуры, звезды разрушаются, и образуется раскаленная плазма из элементарных составляющих вещества. Дальнейшее сжатие сопровождается непрекращающимся ростом температуры, а также плотности первичной плазмы. Если мы представим, что часы отсчитали примерно пятнадцать миллиардов лет назад от современного состояния, известная нам Вселенная сократится до еще меньшего размера. Материя, из которой состоит все: каждый автомобиль, каждое здание, каждая гора на Земле, сама Земля, Луна, Сатурн, Юпитер и все другие планеты, Солнце и все другие звезды Млечного пути, галактика Андромеда с ее 100 миллиардами звезд и все остальные 100 миллиардов галактик – все это сожмется в космических тисках до

чудовищной плотности. А когда часы покажут еще более раннее время, весь космос сожмется до размеров апельсина, лимона, горошины, песчинки и даже до еще более крошечного размера. Если экстраполировать весь этот путь назад, к «началу всех начал», можно прийти к выводу, что Вселенная должна была возникнуть как точка (образ, который мы подвергнем критическому анализу в последующих главах), в которой все вещество и вся энергия были спрессованы до невообразимых плотности и температуры. Считается, что огненный шар, вырвавшийся из этой гремучей смеси в результате Большого взрыва, исторг семена, из которых в дальнейшем развилась известная нам Вселенная.

Образ Большого взрыва как космической вспышки, извергнувшей материальное содержимое Вселенной, как шрапнель из разорвавшейся бомбы, полезен для восприятия, но он может ввести в заблуждение. Когда взрывается бомба, она взрывается в определенном месте в пространстве и в определенный момент времени. Ее содержимое выбрасывается в окружающее пространство. При прокручивании вспять эволюции Вселенной, ее материя сжималась потому, что сокращалось все пространство. Размер апельсина, размер горошины, размер песчинки – обратная эволюция размеров относится ко всей Вселенной, а не к чему-то внутри Вселенной. Следуя вспять все ближе к началу, мы не найдем никакого пространства вне точечной гранаты. Большой взрыв представлял собой извержение сжатого пространства, развертывание которого, подобно приливной волне, и по сей день несет с собой материю и энергию.

Верна ли общая теория относительности?

В экспериментах, выполненных с использованием современной техники, не было обнаружено отклонений от предсказаний общей теории относительности. Только время сможет показать, позволит ли возрастающая точность экспериментов выявить какие-либо отклонения и, тем самым, показать, что эта теория также представляет собой лишь приближенное описание сущности мироздания. Систематическая проверка теорий со все более высокой степенью точности является, конечно, одним из путей развития науки, но это не единственный путь. На самом деле мы уже видели это: поиск новой теории гравитации был инициирован не экспериментальным опровержением теории Ньютона, а конфликтом между ньютоновской гравитацией и другой теорией – специальной теорией относительности. Только после появления общей теории относительности (как конкурирующей теории) были установлены экспериментальные изъяны в теории Ньютона, которые проявлялись в ничтожных, но поддающихся измерению расхождениях между двумя теориями. Таким образом, внутренние теоретические противоречия могутбыть такой же движущей силой прогресса, как и экспериментальные данные.

За последние полвека физики столкнулись с другим теоретическим противоречием, не уступающим противоречию между специальной теорией относительности и ньютоновской гравитацией. Выяснилось, что общая теория относительности, по-видимому, на фундаментальном уровне несовместима с другой чрезвычайно тщательно проверенной теорией – квантовой механикой. Применительно к вопросам, рассмотренным в данной главе, это противоречие не позволяет физикам прийти к пониманию того, что на самом деле происходит с простран-

ством, временем и материей, когда они находятся в спрессованном состоянии, подобном состоянию в момент Большого взрыва или в центре черной дыры. В более общем плане, это противоречие предупреждает нас об отсутствии некоторого фундаментального звена в нашем понимании природы. Разрешить это противоречие не смогли величайшие физики-теоретики, и оно завоевало вполне заслуженную репутацию центральной проблемы современной теоретической физики. Понимание сущности этого противоречия требует знания некоторых основных положений квантовой теории, к которым мы сейчас и перейдем.

Глава 4. Микроскопические странности

Слегка утомившиеся после своей последней экспедиции за пределы Солнечной системы, Джордж и Грейс вернулись на Землю и решили заглянуть в Н-бар (Игра слов: Н-бар (и оригинале H-Bar) представляет собой английское чтение символа, которым обозначается постоянная Планка. – Прим. перев.), чтобы немного освежиться после пребывания в космосе. Джордж, как обычно, заказал сок папайи со льдом для себя и водку с тоником для Грейс, откинулся на спинку кресла, скрестил руки за головой и приготовился наслаждаться сигарой, которую он только что зажег. Собравшись затянуться, он вдруг с изумлением обнаружил, что сигара, которая только что была между его зубами, исчезла. Решив, что сигара могла как-нибудь выскользнуть у него изо рта, Джордж наклонился вперед, ожидая увидеть дырку, прожженную на рубашке или на брюках. Но дырки не было. Сигары не было тоже. Грейс, озадаченная странными движениями Джорджа, огляделась вокруг и увидела, что сигара лежит на стойке прямо за стулом Джорджа. «Странно, – сказал Джордж, – как, черт возьми, могла она туда попасть? Такое чувство, что она прошла прямо сквозь мою голову – но язык не обожжен, и я не чувствую в себе никаких новых дырок». Грейс осмотрела Джорджа и неохотно подтвердила, что его язык и голова выглядят совершенно нормально. Поскольку тут как раз подоспели напитки, Джордж и Грейс пожали плечами и отнесли пропавшую сигару к одной из маленьких тайн жизни. Однако чудеса в Н-баре на этом не закончились.

Джордж бросил взгляд на бокал с соком папайи и увидел, что кубики со льдом находятся в непрерывном движении, постоянно сталкиваясь друг с другом и со стенками бокала, как маленькие автомобили в детском аттракционе. На этот раз удивлен был не он один. Грейс держала в руках свой бокал, который был раза в два меньше, чем у Джорджа, и оба они увидели, что ее кубики льда кружились еще более неистово. Они с трудом могли различить отдельные кубики, которые сливались в одну ледяную массу. Но это было ничто по сравнению с тем, что случилось в следующее мгновение. Глядя изумленными глазами на напитки, совершающие стремительную пляску, они вдруг заметили, как один кубик льда прошел сквозь стенку бокала и упал на стойку. Они схватили бокал и увидели, что он совершенно цел; кубик льда каким-то таинственным образом прошел сквозь стекло, не вызвав никаких повреждений. «Должно быть, галлюцинации после прогулок по открытому космосу», – заметил Джордж. Они остановили бешеную пляску ледяных кубиков, осушив одним глотком свои бокалы, и отправились восстанавливаться домой. Торопясь покинуть заведение, Джордж и Грейс даже не заметили, что по ошибке вышли не через обычную дверь, а через декоративную, нарисованную на стене. Однако персонал Н-бара, давно привыкший к людям, проходящим сквозь стены, даже не заметил их поспешного ухода.

Столетие назад, в то время, когда Конрад и Фрейд исследовали потемки человеческой души, немецкий физик Макс Планк впервые пролил свет на квантовую механику – систему понятий, которая провозглашает, помимо всего прочего, что то, с чем столкнулись Джордж и Грейс в Н-баре (если это происходит в микромире), вовсе не требует для своего объяснения привлечения потусторонних сил. Столь необычные и причудливые события типичны для поведения нашей Вселенной, рассматриваемой на сверхмалых масштабах.

Квантовая теория

Квантовая механика представляет собой систему понятий, предназначенную для понимания свойств микромира. Точно так же, как специальная и общая теории относительности потребовали решительного пересмотра нашего взгляда на мир для случая объектов, которые движутся очень быстро или имеют очень большую массу, квантовая механика установила, что наша Вселенная имеет такие же, если не еше более поразительные свойства, если исследовать ее в масштабе атомных и субатомных расстояний. В 1965 г.

Ричард Фейнман, один из величайших специалистов в области квантовой механики, писал: «Было время, когда газеты сообщали, что только двенадцать человек понимают теорию относительности. Я не верю, что такое время когда-либо было. Могло быть время, когда ее понимал только один человек, тот самый парень, который схватил ее суть перед тем, как написать свою статью. Но после того как люди прочитали его статью, масса людей стала так или иначе понимать теорию относительности, и уж точно число этих людей превышало двенадцать. С другой стороны, я думаю, что могу совершенно спокойно сказать, что квантовую механику не понимает никто»1).

Хотя Фейнман высказал свою точку зрения более тридцати лет назад, она остается справедливой и сегодня. Он имел в виду следующее: хотя специальная и общая теории относительности потребовали волнующего пересмотра нашего видения мира, после того, как вы полностью примете лежащие в их основе фундаментальные принципы, все новые и необычные следствия этих теорий для пространства и времени могут быть получены непосредственно путем логических рассуждений. Если вы достаточно интенсивно поработаете над выводами Эйнштейна, приведенными в предыдущих двух главах, вы сможете хотя бы на короткое время понять неизбежность сделанных им заключений. Не так обстоит дело с квантовой механикой. Примерно к 1928 г. уже было установлено множество математических формул и законов квантовой механики. Затем с их помощью неоднократно делались самые точные и успешные в истории науки количественные предсказания. Однако на самом деле те, кто использует квантовую механику, просто следуют формулам и правилам, установленным «отцами-основателями» теории, и четким и недвусмысленным вычислительным процедурам, но без реального понимания того, почему эти процедуры работают, или что они в действительности означают. В отличие от теории относительности едва ли найдется много людей, если такие найдутся вообше, кто смог понять квантовую механику на «интуитивном» уровне.

Что же нам предпринять в такой ситуации? Означает ли это, что в масштабах микромира Вселенная функционирует столь непонятным и непривычным образом, что человеческое мышление, привыкшее в течение тысячелетий иметь дело с явлениями, протекающими в обычном, макроскопическом масштабе, неспособно до конца понять то, «что происходит в действительности»? Или, быть может, по какой-то исторической случайности, физики создали чрезвычайно уродливую формулировку квантовой механики, которая оказалась успешной с точки зрения количественных предсказаний, но маскирует истинную сущность природы? Этого не знает никто. Может быть, когда-нибудь в будущем появится более талантливый исследователь, который предложит новую формулировку, ясно отвечающую на все «почему» и «как» квантовой механики. А может и не появится. Единственное, что мы знаем наверняка, это то, что квантовая механика совершенно ясно и недвусмысленно показывает, что ряд фундаментальных концепций, имеющих существенное значение для понимания того мира, с которым мы сталкиваемся в повседневной жизни, полностью теряет всякий смысл при переходе к микромиру. В результате, пытаясь понять и объяснить Вселенную на атомном и субатомном уровнях, мы должны кардинально менять наш язык и логику рассуждений.

В последующих разделах мы рассмотрим основы этого языка и опишем ряд удивительных результатов, к которым ведет его применение. Если по ходу изложения квантовая механика покажется вам в целом странной и нелепой, вы должны вспомнить о двух ве-щах. Во-первых, помимо того, что это математически корректная теория, единственная причина, по которой мы доверяем квантовой механике, состоит в том, что ее предсказания подтверждаются с поразительной точностью. Если кто-то сможет рассказать вам со всеми мучительными подробностями массу самых сокровенных историй из вашего детства, трудно будет не поверить, что это ваш давно пропавший брат (или сестра). Во-вторых, вы не одиноки в такой реакции на квантовую механику. Сходной точки зрения придерживалось, в большей или меньшей степени, немало уважаемых физиков. Эйнштейн отказывался признать квантовую механику. И даже Нильс Бор, один из первооткрывателей

квантовой механики, однажды заметил, что если вы никогда не чувствуете себя ошеломленным, когда размышляете о квантовой механике, значит, вы не понимаете ее по-настоящему.

На кухне слишком жарко

Путь к квантовой механике начался с одной сбивающей с толку проблемы. Представьте, что стоящая у вас в доме духовка имеет идеальную изоляцию, что вы установили ее на некоторую температуру, скажем, 200° С, и что у вас достаточно времени, чтобы подождать, пока она нагреется. Даже если перед включением духовки вы откачаете из нее весь воздух, она будет излучать волны в результате нагрева стенок. Это тот же вид излучения (теплота и свет являются разновидностями электромагнитных волн), что и излучение поверхности Солнца или раскаленной докрасна железной кочерги.

Проблема состоит в следующем. Электромагнитные волны переносят энергию. Например, жизнь на Земле критически зависит от солнечной энергии, переносимой с Солнца на Землю электромагнитными волнами. В начале XX столетия физики рассчитали общее количество энергии электромагнитного излучения замкнутой полости, находящейся при заданной температуре. Используя хорошо известные методы расчета, они получили нелепый ответ: при любой заданной температуре общая энергия оказывалась бесконечной.

Всем было ясно, что это нонсенс – духовка может дать значительное количество энергии, но уж точно не бесконечное. Для того чтобы понять решение, предложенное Планком, стоит рассмотреть проблему более детально. Оказалось, что когда электромагнитная теория Максвелла применяется для расчета излучения духовки, она показывает, что волны, генерируемые стенками, должны быть такими, чтобы между противоположными стенками укладывалось целое число максимумов и минимумов. Несколько примеров показано на рис. 4.1.

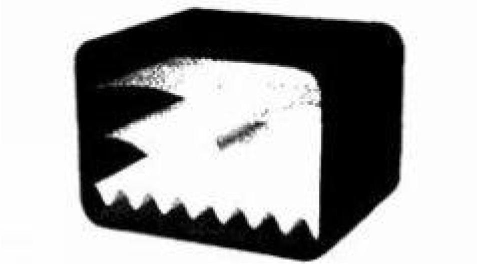

Рис. 4.1. Теория Максвелла говорит нам, что волны излучения в духовке имеют целое число максимумов и минимумов – они совершают полные циклы колебаний

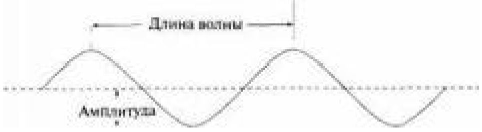

Рис. 4.2. Длина волны определяется как расстояние между соседними максимумами или минимумами. Амплитуда представляет собой наибольшую высоту или глубину волны.

Физики используют для описания таких волн три понятия: длина волны, частота и амплитуда. Длина волны, как показано на рис. 4.2, представляет собой расстояние между соседними максимумами или минимумами волны. Чем больше максимумов и минимумов, тем короче длина волны, так как все они должны уместиться между неподвижными стенками печи. Частота обозначает число циклов колебаний вверх-вниз, которые волна совершает в течение одной секунды. Частота и длина волны являются взаимосвязанными параметрами: чем больше длина волны, тем меньше частота; чем меньше длина волны, тем больше частота. Чтобы понять, почему это так, представьте себе, что вы создаете волны, раскачивая один конец длинного каната, другой конец которого привязан к стенке. Для того чтобы получить волну с большой длиной волны, вы лениво помахиваете концом каната вверх и вниз. Частота волн равна числу движений вашей руки за секунду и, следовательно, является

очень небольшой. Чтобы генерировать более короткую волну, вам придется трясти ваш конец более интенсивно, более часто: это даст волну более высокой частоты. Наконец, физики используют термин амплитуда для описания максимальной высоты или глубины волны (см. рис. 4.2).

Если электромагнитные волны вам кажутся слишком абстрактными, есть другая хорошая аналогия: волны, воспроизводимые при игре на струнах скрипки. Разные длины волн соответствуют разным музыкальным нотам: чем выше частота, тем выше нота. Амплитуда волны, создаваемой скрипичной струной, определяется тем, с какой силой вы цепляете смычком по струне. При большей силе вы вкладываете больше энергии в колебания струны; следовательно, большее количество энергии соответствует большей амплитуде. Результатом будет более громкий звук. Аналогично меньшее количество энергии соответствует меньшей амплитуде и меньшей громкости звука.

Используя установленные в XIX в. уравнения термодинамики, физики смогли определить, какое количество энергии передают горячие стенки духовки электромагнитным волнам каждой разрешенной длины волны, т. е. фактически насколько сильно стенки «цепляют» каждую волну. Полученный результат оказался весьма простым: каждая из разрешенных волн независимо от ее длины волны будет нести одно и то же количество энергии (которое определяется температурой духовки). Иными словами, когда речь идет о количестве переносимой энергии, все возможные волны в духовке оказываются в совершенно равноправном положении.

На первый взгляд мы получили интересный и довольно безобидный результат. Однако это совсем не так. Он провозгласил крах того, что называлось классической физикой. Причина состоит в следующем. Даже при ограничении, чтобы все волны имели целое число максимумов и минимумов, – что исключает огромное число видов волн, – в печи по-прежнему остается бесконечное количество волн с нарастающим количеством максимумов и минимумов. Поскольку каждая волна несет одно и то же количество энергии, бесконечное число волн будет переносить бесконечное количество энергии. Так на рубеже столетий в бочке меда теоретической физики объявилась огромная «гаргантюанская» ложка дегтя.

Деление на порции на рубеже веков

В 1900 г. Планк высказал удивительную догадку, позволившую решить эту головоломку и принесшую ему Нобелевскую премию 1918 г. по физике2). Для того чтобы понять решение Планка, представьте себе, что вы вместе с огромной толпой людей, «бесконечной» по количеству, ютитесь в огромном и холодном ангаре, принадлежащем скаредному домовладельцу. На стенке установлен затейливый цифровой термостат, который регулирует температуру. Узнав, сколько домовладелец требует в уплату за отопление, вы потрясены. Если термостат установлен на 15° С, каждый должен платить домовладельцу по 15 долларов. Если он установлен на 16° С, каждый платит по 16 долларов и т. д. Вы понимаете, что поскольку кроме вас помещение арендует бесконечное число съемщиков, как только отопление будет включено, домовладелец станет получать бесконечную сумму денег.

Однако, более внимательно прочитав правила оплаты, вы обнаруживаете лазейку. Ваш домовладелец очень занятой человек, он не хсчет терять время на отсчитывание сдачи, особенно бесконечному количеству отдельных съемщиков. Поэтому он устанавливает следующую систему оплаты. Те, кто могут выплатить точную сумму без сдачи, платят строго по счету. Остальные платят столько, сколько могут набрать имеющимися у них купюрами, но так, чтобы не нужно было давать сдачи. Поэтому, желая привлечь к оплате всех и, в то же время, избежать непомерной платы за тепло, вы уговариваете своих компаньонов разделить все деньги по следующему принципу. Один из вас собирает все центы, другой – все пятицентовые монеты, третий – все десятицентовые, четвертый – все двадцатипятицентовые и т.д., включая тех, кто будет хранить однодолларовые банкноты,

пятидолларовые, десятидолларовые, двадцатидолларовые, пятидесятидолларовые, стодолларовые и даже банкноты более крупных (и незнакомых) номиналов. Вы нахально устанавливаете термостат на 25° С и ждете появления домовладельца. Когда он приходит, тот компаньон, у которого все центы, платит ему первым, отсчитывая 2 500 монеток. Затем хранитель пятицентовых монет отдает 500 монет; хранитель десятицентовых монет отдает 250 монет, далее платит обладатель 100 двадцатипятицентовых монет, затем идет парень с долларами, отдающий домовладельцу 25 бумажек. Далее хранитель пятидолларовых купюр передает 5 банкнот, а хранитель десятидолларовых банкнот ограничивается только 2 банкнотами (поскольку три десятидолларовые банкноты уже превышают сумму, подлежащую уплате, и требуют сдачи). Ваш компаньон с купюрами по 20 долларов также ограничивается только 1 банкнотой (ибо с двух уже потребуется сдача), а у всех остальных номинал имеющихся у них купюр – минимальная порция денег – превышает требуемую к оплате сумму. Поэтому они не могут заплатить домовладельцу, и в результате, вместо того, чтобы получить бесконечную сумму денег, на которую рассчитывал домовладелец, он удаляется с жалкими 190 долларами.

Планк использовал очень похожий подход для того, чтобы обойти абсурдный вывод о бесконечном количестве энергии в духовке и получить конечное значение. Вот как он добился этого. Планк смело предположил, что количество энергии, переносимой электромагнитной волной в духовке, подобно деньгам, изменяется порциями. Энергия может быть равна одному такому фундаментальному «номиналу энергии», или двум, или трем и т. д. – но это все. Согласно Планку, когда речь идет об энергии, доли не допустимы, точно так же, как вы не можете иметь монету в одну треть цента или в половину от двадцати пяти центов. (В настоящее время денежные номиналы США определяются федеральным казначейством.) В поисках более фундаментального объяснения Планк предположил, что энергетический номинал волны, т.е. минимальное количество энергии, которое она может нести, определяется ее частотой. Точнее, он постулировал, что минимальная энергия, которую может нести волна, пропорциональна ее частоте: большая частота (более короткая длина волны) предполагает большую минимальную энергию, меньшая частота (большая длина волны) – меньшую минимальную энергию. Можно привести такое грубое сравнение: так же, как пологие океанские волны длинны и величественны, а сильные коротки и порывисты, длинноволновое излучение менее энергично, чем коротковолновое.

Расчеты Планка показали, что дискретность допустимой энергии волн избавляет от нелепого результата о бесконечной суммарной энергии. Нетрудно понять, почему это так. Когда духовка нагревается до некоторой заданной температуры, то согласно расчетам, основанным на термодинамике XIX в., каждая волна вносит свой вклад в общую энергию. Однако, подобно компаньонам, которые не могут внести обычную сумму платы домовладельцу, поскольку номинал их денег слишком велик, если минимальная энергия, которую может переносить конкретная волна, превышает ее ожидаемый энергетический вклад, она не дает вклада вообще и остается безучастной. Поскольку минимальная энергия, которую может нести волна, согласно Планку, пропорциональна ее частоте, то, исследуя волны в духовке и переходя к волнам со все более высокой частотой (все меньшей длиной волны), рано или поздно обнаружится, что минимальная энергия, которую может нести волна, превышает ожидаемый энергетический вклад. Подобно компаньонам, которым доверили банкноты с номиналом, превышающим двадцать долларов, эти волны с возрастающими частотами не могут дать вклада, которого требует физика XIX в. Аналогично тому, что только конечное число компаньонов смогло заплатить за тепло, и общая сумма оказалась конечной, только конечное число волн может дать вклад в общую энергию печи, что опять же приводит к конечности полного количества энергии. Говорим ли мы об энергии или о деньгах, порционность фундаментальных единиц и все возрастающий размер этих единиц по мере того, как мы переходим к более высоким частотам (или к более крупным купюрам), приводит к замене бесконечного ответа конечным3).

ħ

Избавившись от очевидно абсурдного бесконечного результата, Планк сделал важный шаг. Но то, что действительно заставило людей поверить в справедливость его догадки – замечательное совпадение результата его нового подхода для вычисления энергии в духовке с экспериментальными данными. Планк обнаружил, что подстроив один параметр, входящий в его новую расчетную схему, можно точно предсказать результаты измерения энергии в духовке для любой заданной температуры. Этот параметр представляет собой коэффициент пропорциональности между частотой волны и минимальным количеством энергии, которую волна может нести. Планк установил, что этот коэффициент пропорциональности, известный ныне как постоянная Планка и обозначаемый символом, составляет в обычных единицах примерно одну миллиардную от одной миллиардной от одной миллиардной доли4'. Ничтожно малая величина постоянной Планка означает, что размер порций энергии обычно очень мал. По этой причине нам, например, кажется, что мы заставляем энергию волны, создаваемой струной скрипки (и, следовательно, громкость звука), изменяться непрерывно. В действительности, однако, энергия волны изменяется дискретными шагами согласно формуле Планка, но размер этих шагов настолько мал, что дискретные скачки от одного уровня громкости к другому кажутся нам плавными переходами. По утверждению Планка, амплитуда этих скачков энергии растет по мере увеличения частоты волны (сопровождаемого уменьшением длины волны). Это тот основной момент, который разрешает парадокс бесконечной энергии.

ћ

Как мы увидим далее, квантовая гипотеза Планка не просто позволяет понять энергетику духовки, но идет гораздо дальше. Она опрокидывает многое из того, что мы считали само собой разумеющимся. Малое значение постоянной Планка заточает в границы микромира большинство отклонений от привычной картины, но если бы постоянная была гораздо больше, то происходящие в Н-баре странные вещи стали бы обыденными. Как мы увидим, аналоги этих странностей являются привычным делом в микромире.

Что представляют собой порции?

Планк не мог обосновать гипотезу дискретности энергии волн, играющую центральную роль в предложенном им решении. За исключением того, что это работает, ни у Планка, ни у кого-либо еще не было никакого рационального объяснения, почему все должно быть именно так. Как заметил однажды физик Георгий Гамов, это подобно тому, как если бы природа разрешала либо пить целый литр пива, либо не пить совсем, не допуская никаких промежуточных доз5). В 1905 г. Эйнштейн нашел объяснение, за которое он получил Нобелевскую премию 1921 г. по физике.

Эйнштейн пришел к своему объяснению, пытаясь решить проблему, известную под названием фотоэлектронной эмиссии (фотоэффекта). В 1887 г. немецкий физик Генрих Герц впервые обнаружил, что когда электромагнитное излучение (свет) падает на некоторые металлы, они испускают электроны. Само по себе это свойство не слишком удивительно. Известно, что некоторые из электронов металлов слабо связаны с ядрами атомов (именно поэтому металлы являются столь хорошими проводниками электричества). Когда свет сталкивается с поверхностью металла, он отдает энергию: при столкновении с вашей кожей это приводит к нагреву тела. Переданная энергия может возбуждать электроны в металлах, при этом некоторые из слабосвязанных электронов могут выбиваться с поверхности.

Странные свойства фотоэффекта становятся явными при более детальном изучении характеристик испускаемых электронов. На первый взгляд может показаться, что при увеличении интенсивности (яркости) света скорость вылетевших электронов также должна увеличиваться, поскольку падающее электромагнитное излучение будет нести больше энергии.

Однако этого не происходит. Вместо этого происходит увеличение числа вылетевших электронов, но их скорость остается постоянной. С другой стороны, было экспериментально

установлено, что скорость вылетевших электронов увеличивается при увеличении частоты падающего света и, соответственно, уменьшается при ее уменьшении. (Для электромагнитных волн в видимой части спектра увеличение частоты соответствует изменению цвета от красного к оранжевому, желтому, зеленому, голубому, синему и, наконец, к фиолетовому. Излучение, частота которого превышает частоту фиолетового света, невидимо: эта часть спектра начинается с ультрафиолетового излучения, за которым следует рентгеновское. Электромагнитные волны, частота которых ниже частоты красного света, также невидимы; они соответствуют инфракрасному излучению.) В действительности, при уменьшении частоты света наступает момент, когда скорость вылетевших электронов падает до нуля, и они перестают вылетать с поверхности независимо от интенсивности источника света. По какой-то неизвестной причине цвет падающего луча света, а не его полная энергия, определяет, испускаются ли электроны, и если испускаются, то какую энергию имеют.

Чтобы понять, как Эйнштейн объяснил эти загадочные факты, вернемся к нашему арендуемому помещению, которое теперь нагревается до комфортной температуры 25° С. Представим, что ненавидящий детей домовладелец потребовал, чтобы все, кому не исполнилось пятнадцати лет, жили в подвале, который взрослые могут видеть с балкона, опоясывающего здание. Более того, любой из огромного количества детей в подвале может выйти из здания, лишь заплатив привратнику плату за выход в 85 центов. (Этот домовладелец такой негодяй.) Взрослые, которые согласно вашему предложению распределили все деньги по номиналам в соответствии с описанной выше схемой, могут передать деньги детям, только бросая их с балкона. Давайте посмотрим, что при этом произойдет.

Держатель одноцентовых монет бросает несколько из них вниз, но это слишком малая сумма, чтобы кто-то из детей мог заплатить за выход. И, поскольку внизу находится «бесконечное» море детей, с криками сражающихся за падающие монеты, то даже если обладатель центов бросит огромное количество монет, ни один ребенок не сможет собрать 85 центов, которые он должен уплатить. То же самое получится у тех взрослых, которые владеют пятицентовыми, десятицентовыми и двадцатипятицентовыми монетами. Хотя каждый из них бросит вниз огромное количество денег, любой ребенок сочтет за счастье, если ему достанется хотя бы одна монета (большинство же не получит ни одной), и уж точно никто не сможет набрать сумму в 85 центов, необходимую для выхода из подвала. Но когда деньги начнет бросать владелец однодолларовых купюр – даже небольшими суммами, доллар за долларом, – те счастливчики, кому удастся поймать одну единственную банкноту, смогут сразу же покинуть подвал. Обратите внимание, что даже когда этот человек наверху как следует расщедрится и начнет бросать доллары бочками, количество выходящих детей увеличится во много раз, но у каждого останется ровно 15 центов после получения сдачи у привратника. Это будет справедливо независимо от числа брошенных долларов.

Рассмотрим теперь, как применить все это к фотоэффекту. Основываясь на рассмотренных выше экспериментальных данных, Эйнштейн решил распространить планковскую дискретную модель энергии волны на новое определение света. Согласно Эйнштейну, световой луч должен рассматриваться как поток микроскопических частиц света, окрещенных химиком Гильбертом Льюисом фотонами (мы уже использовали этот термин в примере со световыми часами, приведенном в главе 2). Для того чтобы дать представление о масштабах в рамках корпускулярной модели света, скажем, что обычная электрическая лампочка мощностью 100 Вт излучает примерно сто миллиардов миллиардов (1020) фотонов в секунду. Эйнштейн использовал это новое положение для объяснения механизма, лежащего в основе фотоэффекта. Он предположил, что электрон вырывается с поверхности металла, если с ним столкнется фотон, обладающий достаточным количеством энергии. А чем определяется энергия отдельного фотона? Для объяснения экспериментальных данных Эйнштейн вслед за Планком предположил, что энергия каждого фотона пропорциональна частоте световой волны (при этом коэффициент

пропорциональности равен постоянной Планка).

Тогда, как и в случае минимальной суммы, необходимой для уплаты за выход ребенка, чтобы вырваться с поверхности, электроны в металле должны испытать соударение с фотоном, обладающим определенным минимальным количеством энергии. (Как и в случае с детьми, сражающимися за деньги, вероятность того, что отдельно взятый электрон испытает соударение более чем с одним фотоном исчезающе мала – большинство электронов не испытает вообще ни одного соударения.) Однако если частота падающего света слишком мала, энергия составляющих его фотонов будет недостаточной, чтобы вырывать электроны. Точно так же, как никто из детей не сможет покинуть подвал, несмотря на огромное количество мелких монет, которые им бросят взрослые, ни один электрон не сможет выйти из металла, несмотря на огромное общее количество энергии, содержащейся в падающем свете, если его частота (и, следовательно, энергия отдельных фотонов) будет слишком низкой.

Но так же, как дети смогут начать покидать подвал, как только номинал бросаемых им денег станет достаточно большим, электроны начнут вырываться с поверхности металла, как только частота падающего на них света – его энергетический номинал – станет достаточно высокой. Далее, так же, как в случае, когда владелец однодолларовых купюр увеличил общую сумму сбрасываемых денег, увеличив число бросаемых банкнот, интенсивность луча света, имеющего заданную частоту, возрастет при увеличении числа фотонов, которые он содержит. И точно так же, как большее число долларов приведет к тому, что больше детей смогут покинуть подвал, увеличение числа фотонов приведет к тому, что большее число электронов испытает соударение и покинет металл. Обратите внимание, что энергия каждого из этих электронов после выхода из металла зависит исключительно от частоты светового луча, а не от его суммарной интенсивности. Так же, как дети покидают подвал с 15 центами, независимо от того, сколько купюр было брошено им с балкона, каждый электрон покидает поверхность с одной и той же энергией и, следовательно, с одной и той же скоростью, независимо от общей интенсивности падающего света. Большее количество денег просто означает, что большее число детей смогут покинуть подвал; большая суммарная энергия светового луча означает, что больше электронов будет вырвано из металла. Если мы хотим, чтобы дети покидали подвал с большим количеством денег, мы должны увеличить номинал купюр, которые им бросаем; если мы хотим, чтобы электроны выходили из металла с большей скоростью, следует увеличить частоту падающего светового луча, т. е. увеличить энергетический номинал фотонов, которые падают на поверхность металла.

Сказанное полностью подтверждается экспериментальными данными. Частота света (его цвет) определяет скорость вылетающих электронов, суммарная интенсивность света – количество вылетевших электронов. Таким образом, Эйнштейн показал, что гипотеза Планка о дискретности энергии на самом деле отражает фундаментальное свойство электромагнитных волн: они состоят из частиц – фотонов, которые представляют собой маленькие порции или кванты света. Дискретность энергии, заключенной в таких волнах, связана с тем, что они состоят из дискретных объектов.

Прозрение Эйнштейна представляло собой большой шаг вперед. Но, как мы увидим ниже, история была не такой гладкой, как может показаться.

Волна или частица?

Каждому известно, что вода (и, следовательно, волны на поверхности воды) состоит из огромного количества молекул. Поэтому так ли удивительно, что световые волны тоже состоят из огромного числа частиц – фотонов? Удивительно. Но главный сюрприз кроется в деталях. Дело в том, что более трехсот лет назад Ньютон провозгласил, что свет представляет собой поток частиц, так что сама идея не нова. Однако ряд коллег Ньютона, среди которых наиболее выделялся голландский физик Христиан Гюйгенс, оспорили это мнение, утверждая, что свет представляет собой волну. Долгое время этот вопрос был

предметом ожесточенных дебатов, пока эксперименты, выполненные в начале XIX в. английским физиком Томасом Юнгом, не показали, что Ньютон ошибался.

Вариант установки в эксперименте Юнга, известном под названием опыта с двумя щелями, схематически показан на рис. 4.3. Фейнман любил говорить, что вся квантовая механика может быть выведена путем тщательного осмысливания следствий одного этого эксперимента, поэтому он заслуживает того, чтобы рассмотреть его поподробнее. Как видно из рис. 4.3, свет падает на сплошную преграду, в которой сделаны две щели. Свет, который прошел через щели, регистрируется на фотопластинке – более светлые области на фотографии указывают на те места, куда попало больше света. Эксперимент состоит в сравнении картин, полученных на фотопластинках, когда открыты одна или обе щели и включен источник света.

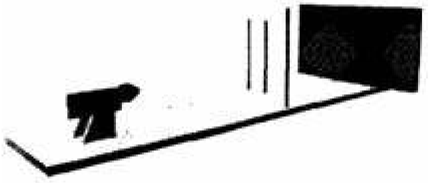

Рис. 4.3. В эксперименте с двумя щелями луч света падает на преграду, в которой проделаны две щели. Когда открыта одна или обе щели, луч света, проходящий через преграду, регистрируется с помощью фотопластинки.

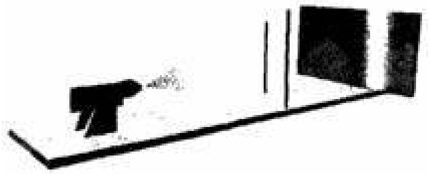

Рис. 4.4. В этом опыте открыта правая щель, в результате изображение на фотопластинке будет выглядеть, как показано на рисунке.

Если левая щель закрыта, а правая открыта, фотография будет выглядеть, как показано на рис. 4.4. Картина вполне объяснима, поскольку свет, который попадает на фотопластинку, проходит только через одну щель и поэтому концентрируется в правой части фотографии. Аналогично, если мы закроем правую щель, а левую оставим открытой, фотография будет выглядеть, как показано на рис. 4.5.

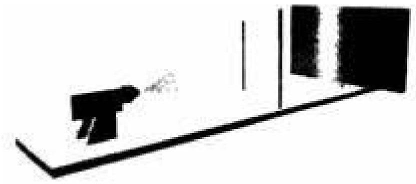

Рис. 4.5. Те же условия, как и в опыте, показанном на рис. 4.4, за исключением того, что открыта левая щель.

Если открыты обе щели, то картина, предсказываемая ньютоновской корпускулярной моделью света, должна выглядеть, как показано на рис. 4.6, представляющем собой комбинацию рис. 4.4 и 4.5.

Рис. 4.6. Ньютоновская корпускулярная модель предсказывает, что когда будут открыты обе щели, картина на фотопластинке будет представлять собой объединение картин, показанных на рис. 4.4 и 4.5.

По существу, если представить ньютоновские световые корпускулы в виде маленьких дробинок, которыми вы обстреливаете преграду, то те из дробинок, которые пройдут сквозь

нее, будут концентрироваться в двух полосах, положение которых соответствует положению щелей. Волновая же модель света, напротив, ведет к совершенно иному предсказанию, если открыты обе щели. Посмотрим, что происходит в этом случае.

Представим, что вместо световых волн мы рассматриваем волны на поверхности воды. Это не повлияет на результат, но такие волны более наглядны. Когда волна сталкивается с преградой, то, как показано на рис. 4.7, от каждой щели распространяется новая волна, похожая на ту, которая возникает, если бросить камешек в пруд. (Это легко проверить, используя картонный лист с двумя прорезями, помещенный в чашку с водой.) Когда волны, идущие от каждой щели, накладываются друг на друга, происходит интересное явление. При наложении двух волновых максимумов высота волны в соответствующей точке увеличивается – она равна сумме высот максимумов двух наложившихся волн. Аналогично, при наложении двух минимумов глубина впадины, образовавшейся в этой точке, также увеличивается. Наконец, если максимум одной волны совпадает с минимумом другой, они взаимно гасят друг друга. (На этом основана конструкция фантастических шумопоглощающих наушников – они определяют форму пришедшей звуковой волны и генерируют другую, форма которой в точности «противоположна» первой, что приводит к подавлению нежелательного шума.) Между этими крайними случаями – максимум с максимумом, минимум с минимумом и максимум с минимумом – расположен весь спектр частичного усиления и частичного ослабления. Если вы с компанией друзей сядете в небольшие лодки, выстроите их в линию параллельно преграде и каждый из вас будет сообщать, насколько сильно его качает при прохождении волны, результат будет похож на тот, который изображен на рис. 4.7.

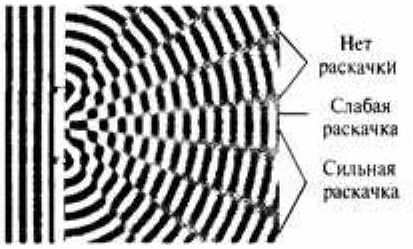

Рис. 4.7. Круговые волны на воде, идущие от каждой щели, накладываются одна на другую; это приводит к тому, что в одних местах результирующая волна будет усиливаться, а в других ослабляться.

Точки с сильной качкой будут расположены там, где накладываются максимумы (или минимумы) волн, приходящих от разных щелей. Участки с минимальной качкой или полным ее отсутствием окажутся там, где максимумы волны, идущей от одной щели, будут совпадать с минимумами волны, идущей от другой щели.

Поскольку фотографическая пластинка регистрирует, насколько сильно она «раскачивается» под влиянием падающего света, из приведенных выше рассуждений, примененных к волновой картине, создаваемой лучом света, следует, что когда открыты обе щели, фотография будет иметь вид, показанный на рис. 4.8. Самые яркие участки на рис. 4.8 представляют области, в которых максимумы (или минимумы) световых волн, пришедших от разных щелей, совпадают. Темными являются участки, в которых максимум одной волны складывается с минимумом другой, приводя к взаимному погашению. Такая последовательность светлых и темных полос известна под названием интерференционной картины.

Рис. 4.8. Если свет представляет собой волну, тс в тех случаях, когда открыты обе щели, будет про исходить интерференция между волнами, прошед шими через разные щели.

Эта фотография существенно отличается от рис. 4.6, и, следовательно, требуется

эксперимент, который позволил бы установить, какая из теорий права – корпускулярная или волновая. Подобный эксперимент был выполнен Юнгом, и его результат совпал с картиной, показанной на рис. 4.8, тем самым подтвердив волновую природу света. Ньютоновская теория корпускулярной природы света была отвергнута (хотя потребовалось некоторое время, прежде чем все физики согласились с этим). Доминирующая волновая теория света впоследствии получила надежное математическое обоснование в теории Максвелла.

Но Эйнштейн, низвергнувший заслуженную теорию гравитации Ньютона, похоже, возродил ньютоновскую корпускулярную модель света, введя понятие фотонов. Конечно, перед нами по-прежнему стоит вопрос: как объяснить интерференционную картину, показанную на рис. 4.8, с точки зрения корпускулярной теории? На первый взгляд можно предложить следующее объяснение. Вода состоит из молекул H2O – «частиц» воды. Однако когда огромные количества этих молекул движутся в одном потоке, они могут создавать волны на поверхности воды, с присущими этим волнам интерференционными свойствами, показанными на рис. 4.7. Можно предположить, что в корпускулярной модели света волновые эффекты, например, интерференционные картины, возникают благодаря взаимодействию огромного числа световых корпускул – фотонов.

В действительности, однако, микромир устроен гораздо более тонко. Даже если интенсивность источника света на рис. 4.8 начнет уменьшаться вплоть до такого значения, когда в сторону преграды один за другим будут излучаться одиночные фотоны со скоростью, скажем, один фотон в десять секунд, результат на фотопластинке будет выглядеть точно так же, как показано на рис. 4.8. Если вы подождете достаточно долго, чтобы огромное число этих отдельных частиц света прошло через щели и оставило свой след в виде точек на фотопластинках, эти точки образуют показанную на рис. 4.8 интерференционную картину. Это поразительно. Как могут отдельные фотоны, последовательно проходящие через экран и независимо сталкивающиеся с фотопластинкой, «сговориться» и воспроизвести яркие и темные полосы интерференционной картины? Здравый смысл говорит нам, что каждый фотон проходит либо через левую, либо через правую щель, и результирующая картина должна быть похожа на ту, которая показана на рис. 4.6. Но это не так.

Если этот факт не поразил вас, это значит, что либо вы уже сталкивались с ним и знаете ему объяснение, либо наше описание является недостаточно наглядным. Если дело в последнем, попробуем взглянуть на это явление еще раз, но под несколько иным углом зрения. Итак, вы закрываете левую щель и пускаете фотоны на преграду, один за другим. Некоторые из них проходят через преграду, некоторые нет. Те, которые прошли, точка за точкой создают изображение на фотопластинке, которое выглядит, как показано на рис. 4.4. Вслед за этим вы проводите эксперимент с новой фотопластинкой, но на этот раз открываете обе щели. Как и следовало ожидать, вы считаете, что это только увеличит число фотонов, прошедших через преграду и попавших на фотографическую пластинку, т. е. на пластинку попадет больше света, чем в первом опыте. Но когда позднее вы изучаете полученную фотографию, вы видите, что наряду с участками, которые были темными в первом опыте и стали светлыми во втором, есть участки, которые были светлыми в первом опыте, а во втором стали темными, как на рис. 4.8. Увеличив число фотонов, попавших на фотопластинку, вы уменьшили яркость некоторых участков. Каким-то образом отдельные фотоны, разделенные во времени, смогли нейтрализовать друг друга. Подумайте о всей неординарности того, что произошло: фотоны, которые прошли через правую щель и попали на пленку в одной из темных полос на рис. 4.8, не смогли сделать этого при открытой левой щели (поэтому пленка и осталась темной). Но как могло повлиять на крошечную частицу света, прошедшую через одну щель, то обстоятельство, была ли открыта другая щель? Фейнман однажды заметил, что это так же странно, как если бы вы стреляли по экрану из пулемета, и когда были открыты обе щели, то отдельные, независимо вылетевшие пули каким-то образом нейтрализовали друг друга, оставляя непораженные участки на экране – участки, которые были поражены, когда открытой была только одна щель.

Эти эксперименты показали, что частицы света Эйнштейна довольно существенно

отличаются от частиц Ньютона. Каким-то образом фотоны – хотя они и являются частицами – обладают также и волновыми свойствами света. Тот факт, что энергия этих частиц определяется параметром, используемым для описания волн, т. е. частотой, является первым признаком того, что это странное объединение действительно имеет место. Однако фотоэффект и эксперимент с двумя щелями еще более озадачивают нас. Фотоэффект показывает, что свет имеет свойства частиц. Эксперимент с двумя щелями демонстрирует, что свет также проявляет интерференционные свойства, характерные для волн. Вместе они показывают, что свет обладает и волновыми, и корпускулярными свойствами. Микромир требует, чтобы при попытке его описания мы отказались от наших интуитивных представлений о том, что любой объект представляет собой либо волну, либо частицу, и чтобы мы учитывали возможность того, что он может быть волной и частицей одновременно. Это один из тех случаев, когда высказывание Фейнмана о том, что «никто не понимает квантовую механику», является особенно актуальным. Мы можем произносить слова типа «корпускулярно-волновой дуализм». Мы можем преобразовать эти слова в математическую модель, которая воспроизведет экспериментальные данные с поразительной точностью. Но добиться глубокого, интуитивного понимания этой ошеломляющей особенности микромира необычайно трудно.

Частицы материи также являются волнами

В течение первых десятилетий XX в. многие крупнейшие физики-теоретики неустанно трудились над разработкой математически строгой и физически обоснованной теории, объясняющей остававшиеся доселе неведомыми свойства микромира. Так, под руководством Нильса Бора был достигнут значительный прогресс в объяснении свойств света, излучаемого атомами водорода при высокой температуре. Однако эта и другие работы, выполненные до середины 1920-х гг., представляли собой скорее временный союз идей XIX столетия с впервые полученными концепциями квантовой механики, а не гармоничную систему понимания мироздания. По сравнению с ясными и логичными системами ньютоновских законов движения или электромагнитной теории Максвелла, разработанная только частично квантовая механика находилась в хаотическом состоянии.

В 1923 г. молодой французский аристократ, князь Луи де Бройль, добавил новый элемент в квантовую мешанину, который вскоре помог разработать математический аппарат современной квантовой механики и принес ему Нобелевскую премию 1929 г. по физике. Вдохновленный цепочкой рассуждений, восходящих к специальной теории относительности Эйнштейна, де Бройль предположил, что корпускулярно-волновой дуализм применим не только к свету, но и к веществу. Его аргументы, если опустить детали, состоят в том, что эйнштейновское уравнение Е = тс2 связывает массу с энергией; но с другой стороны, Планк и Эйнштейн связали энергию с частотой волн. Объединяя эти два факта, можно прийти к выводу, что масса должна иметь и волновое воплощение. После долгих размышлений де Бройль предположил, что так же, как свет является волновым явлением, которое, как показывает квантовая теория, имеет равно обоснованное корпускулярное описание, так и электрон, который мы обычно считаем частицей, может иметь равно обоснованное волновое описание. Эйнштейн сразу принял идею де Бройля, поскольку она была естественным развитием его собственного вклада в теорию относительности и теорию фотонов. Однако без экспериментального подтверждения все равно нельзя было обойтись. Такое подтверждение было вскоре получено в работах Клинтона Дэвиссона и Лестера Джермера.

В середине 1920-х гг. Дэвиссон и Джермер, физики-экспериментаторы из лаборатории телефонной компании Белл, исследовали рассеяние электронов на атомах никеля. Для нас их исследования интересны тем, что кристаллы никеля в этих экспериментах действовали во многом подобно щелям в опыте, описанном и проиллюстрированном в предыдущем разделе. На самом деле можно считать эксперименты практически идентичными, за исключением того, что вместо луча света использовался пучок электронов. Дэвиссон и Джермер

исследовали электроны, пропуская их через две щели, сквозь которые они могли попадать на фосфоресцирующий экран, оставляя на нем светящиеся точки, точно так же, как на экране телевизора, и обнаружили поразительное явление. На экране появлялась картина, очень похожая на ту, которая показана на рис. 4.8. Эксперимент, таким образом, показывал, что электроны создают интерференционную картину, которая является неоспоримым признаком волн. В темных точках на фосфоресцирующем экране электроны каким-то образом «нейтрализовали» друг друга, совсем как при наложении гребней и впадин волн, распространяющихся по поверхности волны. Даже если «сжать» пучок электронов до такой степени, что один электрон будет излучаться один раз в десять секунд, отдельные электроны по-прежнему будут образовывать яркие и темные полосы – по одному пятну за один раз. Как и фотоны, отдельные электроны каким-то образом «интерферируют» сами с собой в том смысле, что с течением времени отдельные электроны воссоздают интерференционную картину, которая ассоциируется с волнами. Мы с неизбежностью вынуждены заключить, что наряду с более привычным описанием на языке частиц каждый электрон проявляет и волновые свойства.

$\hbar$

$\hbar$

$\hbar$

Описанные выше эксперименты относятся к электронам, однако схожие эксперименты позволяют сделать вывод о том, что все вещество имеет волновые свойства. Но как это согласуется с нашим повседневным опытом, говорящем о том, что вещество – это нечто сплошное и твердое, и уж никак не похожее на волны? Де Бройль предложил формулу для длины волны частиц вещества, которая показывает, что длина волны пропорциональна постоянной Планка h. (Если говорить более точно, длина волны определяется как частное от деления на импульс материального тела.) Поскольку величина очень мала, длина волны также является очень малой по обычным масштабам. Именно по этой причине волновые характеристики материи становятся наблюдаемыми только в высокоточных микроскопических исследованиях. Точно так же, как большая величина скорости света с скрывает истинные свойства пространства и времени, малость маскирует волновые свойства материи в окружающем нас мире.

Волны чего?

Явление интерференции, открытое Дэвиссоном и Джермером, реально продемонстрировало, что электроны подобны волнам. Но при этом возникает естественный вопрос: волнам чего? Одно из первых предположений на эту тему, сделанное австрийским физиком Эрвином Шредингером, заключалось в том, что эти волны представляют собой «размазанные» электроны. Это предположение отчасти улавливало «сущность» электронной волны, но было слишком неточным. Когда вы размазываете что-нибудь, часть его находится здесь, а другая часть в другом месте. Однако никому и никогда не приходилось иметь дело с половиной или с третью, или с иной частью электрона. Это усложняло понимание того, что представляет собой размазанный электрон. В 1926 г. немецкий физик Макс Борн существенно уточнил предложенную Шредингером интерпретацию электронной волны, и именно этой интерпретацией, усиленной Бором и его коллегами, мы пользуемся и сегодня. Утверждение Борна касается одного из самых странных свойств квантовой теории, тем не менее, оно подтверждается огромным количеством экспериментальных данных. Согласно этому утверждению электронная волна должна интерпретироваться с точки зрения вероятности. В тех областях, где амплитуда (или, точнее, квадрат амплитуды) волны больше, обнаружение электрона более вероятно; в местах, где амплитуда мала, вероятность обнаружить электрон меньше. Пример показан на рис. 4.9.

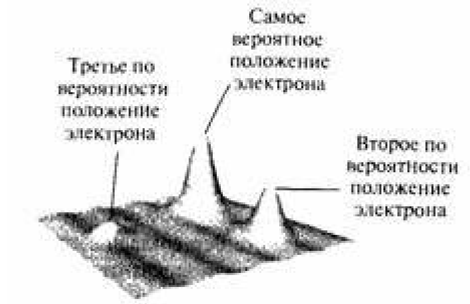

Рис. 4.9. Волна, ассоциированная с электроном, имеет наибольшую амплитуду в тех местах, где обнаружение электрона наиболее вероятно; амплитуда волны убывает по мере уменьшения вероятности обнаружения электрона.

Это действительно необычная идея. Какое отношение имеет вероятность к формулировке фундаментальных законов физики? Мы привыкли к тому, что вероятность присуща лошадиным бегам, подбрасыванию монеты или игре в рулетку, но в этих случаях она просто является отражением неполноты нашего знания. Если мы точно знаем скорость колеса рулетки, вес и твердость шарика, который бегает по нему, положение и скорость шарика в тот момент, когда он падает на колесо, свойства материала ячеек и т. п., и если мы используем для наших вычислений достаточно мощные компьютеры, мы можем, в соответствии с законами классической физики, совершенно точно предсказать, где остановится шарик. В казино полагаются на неспособность игрока получить всю эту информацию и провести необходимые вычисления перед тем, как сделать ставку. Однако ясно, что вероятность, с которой приходится сталкиваться во время игры в рулетку, не отражает никаких фундаментальных свойств Вселенной. Напротив, квантовая механика вводит понятие вероятности в устройство мироздания на гораздо более глубоком уровне. Согласно утверждению Борна, подкрепленному собранными более чем за полвека экспериментальными данными, наличие у материи волновых свойств подразумевает, что фундаментальное описание материи должно иметь вероятностный характер. Закон де Бройля показывает, что для макроскопических объектов, таких как кофейная чашка или рулеточное колесо, волновые свойства являются практически ненаблюдаемыми, и в обычных ситуациях связанная с ними квантово-механическая вероятность может полностью игнорироваться. Но этот же закон говорит, что на микроскопическом уровне мы, в лучшем случае, можем указать только вероятность того, что электрон будет обнаружен в любом заданном месте.

Допустим, что электронные волны обладают теми же свойствами, что и все другие волны, например, они могут сталкиваться с препятствиями и образовывать вторичные волны. Однако в рамках вероятностного описания из этого не следует, что сам электрон распадается на части. Это означает лишь, что имеются области, в которых электрон может появиться с ненулевой вероятностью. На практике это означает, что если мы будем снова и снова повторять совершенно одинаковым образом какой-либо эксперимент с электроном, касающийся, например, измерения его положения, мы не будем всегда получать одинаковый результат. Повторяющиеся эксперименты дадут набор различных результатов, в которых частота появления электрона в заданном месте будет функцией плотности вероятности электронной волны. Если функция плотности вероятности для волны (или, точнее, квадрат плотности вероятности) для точки А в два раза больше, чем для точки В, то при многократном повторении опыта мы увидим, что электрон будет обнаруживаться в точке А в два раза чаще, чем в точке В. Точный результат эксперимента не может быть предсказан; лучшее, что можно сделать – предсказать вероятность данного возможного исхода.

Однако если математическое выражение для функции плотности вероятности известно точно, то даже при такой неопределенности исходов вероятностный прогноз может быть проверен путем многократного повторения эксперимента, что позволяет экспериментально определить вероятность того или иного конкретного результата. Всего через несколько месяцев после появления гипотезы де Бройля Шредингер сделал важный шаг в этом направлении, предложив уравнение, которое определяет форму и эволюцию таких

вероятностных волн, или, как они теперь называются, волновых функций. Вскоре уравнение Шредингера и вероятностная интерпретация были использованы для получения фантастически точных предсказаний. Таким образом, к 1927 г. классическая наивность была утрачена. Ушли те дни, когда Вселенная представлялась работавшим как часы механизмом, объекты которого, приведенные в движение в какой-то момент в прошлом, покорно следовали к неизбежному, единственным образом определяемому пункту назначения. Согласно квантовой механике Вселенная развивается в соответствии со строгими и точными математическими законами, но эти законы определяют только вероятность того, что может наступить то или иное конкретное будущее, и ничего не говорят о том, какое будущее наступит в действительности.

Многие сочтут этот вывод обескураживающим или даже совершенно неприемлемым. Одним из таких людей был Эйнштейн. В одном из наиболее известных в истории физики высказываний он предостерегал сторонников квантовой механики: «Бог не играет в кости со Вселенной». Он считал, что вероятность появляется в фундаментальной физике по той же причине, по которой она появляется в игре в рулетку: вследствие существенной неполноты нашего знания. С точки зрения Эйнштейна, во Вселенной нет места для будущего, точное содержание которого включает элементы вероятности. Физики должны предсказывать, как будет развиваться Вселенная, а не определять вероятность того, что события могут пойти каким-то путем. Но эксперимент за экспериментом (некоторые из наиболее впечатляющих были выполнены уже после его смерти) убедительно подтверждали, что Эйнштейн был не прав. Как заметил однажды по этому поводу британский физик-теоретик Стивен Хокинг. «Заблуждался Эйнштейн, а не квантовая теория»6).

Тем не менее, споры о том, что же в действительности представляет собой квантовая механика, не утихают. Все согласны в том, как использовать уравнения квантовой механики для получения точных предсказаний. Нет согласия в вопросах о том, что в действительности представляют собой волновые функции, каким образом частица «выбирает», какому из многих вариантов будущего ей следовать. Нет согласия даже в вопросе о том, действительно ли она выбирает или вместо этого разделяется, подобно разветвляющемуся руслу реки, и живет во всех возможных будущих, в вечно расширяющемся мире параллельных вселенных. Эти интерпретации сами по себе заслуживают отдельной книги, и, в действительности, есть немало превосходных книг, пропагандирующих тот или иной взгляд на квантовую теорию. Но совершенно определенным кажется тот факт, что независимо от интерпретации квантовой механики, она неопровержимо доказывает, что Вселенная основана на принципах, которые являются неестественными с точки зрения повседневного опыта.

Общий урок, который дают теория относительности и квантовая механика, состоит в том, что в ходе глубоких исследований основ мироздания можно столкнуться с фактами, которые очень сильно отличаются от наших ожиданий. Отвага при постановке новых вопросов может потребовать непредвиденной гибкости, когда нам придется принимать неожиданные точки зрения.

Точка зрения Фейнмана

Ричард Фейнман был одним из величайших физиков-теоретиков со времен Эйнштейна. Он полностью принял вероятностную интерпретацию квантовой механики, но после Второй мировой войны предложил новый взгляд на эту теорию. С позиций численных предсказаний точка зрения Фейнмана полностью согласуется с тем, что было известно ранее. Но ее формулировка существенно отличается от общепринятой. Рассмотрим ее в контексте экспериментов с электронами и двумя щелями.

Проблема с интерпретацией рис. 4.8 возникает потому, что в нашем представлении электрон проходит либо через левую щель, либо через правую, и поэтому мы рассчитываем увидеть комбинацию картин рис. 4.4 и 4.5, показанную на рис. 4.6. Электрону, проходящему через правую щель, должно быть все равно, существует ли левая щель, и наоборот. Но

каким-то образом он ее чувствует. Получаемая интерференционная картина требует взаимодействия и сообщения между чем-то, чувствительным к обеим щелям, даже если электроны выстреливаются поодиночке. Шредингер, де Бройль и Борн объясняли этот феномен, приписывая каждому электрону волновую функцию. Подобно волнам на поверхности воды, показанным на рис. 4.7, волны функции плотности вероятности электрона «видят» обе щели и испытывают своего рода интерференцию при наложении. На тех участках, где вероятностная волна усиливается при наложении, подобно участкам значительного усиления колебаний на рис. 4.7, обнаружение электрона вероятно, а там, где вероятностная волна ослабляется при наложении, подобно местам с минимальной амплитудой или отсутствием колебаний на рис. 4.7, обнаружение электрона маловероятно или невероятно. Электроны сталкиваются с фосфоресцирующим экраном один за другим, распределенные в соответствии с функцией плотности вероятности и, в конечном итоге, образуют интерференционную картину, схожую с той, которая показана на рис. 4.8.

Фейнман выбрал другой подход. Он усомнился в основном классическом предположении, согласно которому каждый электрон проходит либо через левую щель, либо через правую. На первый взгляд это предположение настолько фундаментально, что сомневаться в нем нелепо. В конце концов, разве вы не можете заглянуть в область, расположенную между щелями и фосфоресцирующим экраном, и посмотреть, сквозь какую щель проходит каждый электрон? Да, вы можете. Но тем самым вы измените эксперимент. Чтобы увидеть электрон, вы должны сделать с ним что-нибудь – например, осветить его, т. е. столкнуть с ним фотон. В повседневных масштабах фотон действует как исчезающе малый зонд, который отскакивает от деревьев, картин и людей, не оказывая практически никакого влияния на движение этих сравнительно больших материальных тел. Но электрон – это ничтожно малая частица материи. Независимо от того, насколько осторожно вы будете определять щель, через которую он прошел, отражающиеся от электрона фотоны неизбежно повлияют на его последующее движение. А это изменение движения изменит результат нашего эксперимента. Если ваше вмешательство будет достаточно сильным для того, чтобы вы смогли определить щель, через которую прошел электрон, результат эксперимента изменится, и вместо картины, показанной на рис. 4.8, вы получите картину, подобную той, которая изображена на рис. 4.6! Квантовый мир гарантирует, что как только вы установили, через какую щель, правую или левую, прошел каждый электрон, интерференция между этими двумя щелями исчезнет.

Таким образом, Фейнман укрепился в своих сомнениях: хотя повседневный опыт говорит о том, что электрон должен проходить через одну из двух щелей, к концу 1920-х гг. физики поняли, что любая попытка проверить это якобы фундаментальное свойство неизбежно приведет к искажению результатов эксперимента.

Фейнман провозгласил, что каждый электрон, который проходит через преграду и попадает на фосфоресцирующий экран, проходит через обе щели. Это звучит дико, но не торопитесь возмущаться, вас ждут еще более сумасшедшие заявления. Фейнман высказал утверждение, что на отрезке от источника до некоторой точки на фосфоресцирующем экране каждый отдельно взятый электрон на самом деле перемещается по всем возможным траекториям одновременно; некоторые из этих траекторий показаны на рис. 4.10.

Рис. 4.10. Согласно формулировке квантовой механики, предложенной Фейнманом, частица, перемещающаяся из одной точки в другую, движется одновременно по всем возможным путям. Здесь показано несколько из бесконечного числа возможных траекторий для одного электрона, движущегося от источника к фосфоресцирующему экрану. Обратите внимание, что этот один электрон на самом деле проходит через обе щели.

Электрон вполне упорядоченным образом проходит через левую щель. Одновременно он столь же упорядоченно проходит через правую щель. Он направляется к левой щели, но вдруг меняет направление и устремляется к правой. Он петляет вперед и назад и, наконец, проходит через левую щель. Он отправляется в долгое путешествие к туманности Андромеды, там он разворачивается, возвращается назад и проходит через левую щель на пути к экрану. Он движется и так и этак – согласно Фейнману, электрон одновременно «рыщет» по всем возможным путям, соединяющим пункт отправления и пункт назначения.

Фейнман показал, что каждому из этих путей можно поставить в соответствие некоторое число, и общее среднее этих чисел даст ту же вероятность, что и расчет с использованием волновой функции. Итак, с точки зрения Фейнмана, с электроном не нужно связывать никакой вероятностной волны. Вместо этого мы должны представить себе нечто столь же, если не более, странное. Вероятность того, что электрон, – который во всех отношениях проявляет себя частицей, – появится в некоторой заданной точке экрана, определяется суммарным эффектом от всех возможных путей, ведущих в эту точку. Этот подход к квантовой механике известен как фейнмановское «суммирование по путям»7).

Здесь начинает протестовать наше классическое образование: как может один электрон одновременно перемещаться по различным путям, да еще и по бесконечному числу путей? Это возражение кажется неоспоримым, но квантовая механика – реальная физика нашего мира – требует, чтобы вы держали столь тривиальные возражения при себе. Результаты расчетов с использованием фейнмановского подхода согласуются с результатами, полученными с применением метода волновых функций, которые, в свою очередь, согласуются с экспериментальными данными. Вы должны позволить природе самой определять, что является разумным, а что – неразумным. Как написал в одной из своих работ Фейнман: «[Квантовая механика] дает совершенно абсурдное с точки зрения здравого смысла описание Природы. И оно полностью соответствует эксперименту. Так что я надеюсь, что вы сможете принять Природу такой, как Она есть – абсурдной»8'.

Однако независимо от того, насколько абсурдной является природа на уровне микромира, при переходе к нашим обычным масштабам любая теория должна приводить к привычным прозаичным событиям. Как показал Фейнман, для движения больших тел, таких как бейсбольные мячи, аэропланы или планеты, каждое из которых является огромным по сравнению с субатомными частицами, его правило определения весов различных траекторий гарантирует, что все траектории, кроме одной, взаимно сократятся при суммировании их вкладов. В действительности, когда дело касается движения классического тела, значение имеет только одна траектория из бесконечного их количества. И это именно та траектория, которая следует из ньютоновских законов движения. Вот почему в нашем повседневном мире нам кажется, что тела (такие, как брошенный в воздух мяч) следуют вдоль единственной, уникальной и предсказуемой траектории из начальной точки в пункт назначения. Но для объектов микромира фейнмановское правило назначения весов траекториям показывает, что свой вклад в движение объекта могут вносить (и часто вносят) многочисленные возможные траектории. Например, в эксперименте с двумя щелями некоторые из траекторий проходят через разные щели, приводя к образованию интерференционной картины. В микромире мы не можем гарантировать, что электрон пройдет только через одну щель или только через другую. Интерференционная картина и фейнманов-ская альтернативная формулировка квантовой механики недвусмысленно поддерживают друг друга.

Как разные мнения о книге или фильме могут оказаться полезными для понимания различных моментов этого произведения, так и различные подходы к квантовой механике помогают углубить понимание этой теории. Хотя предсказания метода волновых функций и фейнмановского суммирования по траекториям полностью согласуются друг с другом, в их основе лежат совершенно различные представления. Как мы увидим позднее, для разных приложений тот или иной подход может стать неоценимым средством объяснения.

Квантовые чудеса

К настоящему моменту у вас должно было появиться некоторое представление о волнующем новом образе мироздания согласно квантовой механике. Если вы еще не впечатлились от поразительных высказываний Бора, квантовые чудеса, о которых пойдет речь ниже, заставят вас, по крайней мере, испытать головокружение.

Квантовую механику трудно понять на интуитивном уровне, еще труднее, чем теорию относительности – для этого нужно начать мыслить подобно миниатюрному человечку, родившемуся и выросшему в микромире. Существует, однако, одно положение этой теории, которое может служить путеводителем для интуиции, своего рода пробным камнем, который отличает квантовую логику от классической. Это соотношение неопределенностей, открытое немецким физиком Вернером Гейзенбергом в 1927 г.

Это соотношение выросло из проблемы, с которой мы уже сталкивались выше. Мы установили, что процедура определения щели, через которую проходит каждый из электронов (т. е. определение положения электронов), неизбежно вносит возмущения в их последующее движение. Однако вспомним, что убедиться в присутствии другого человека можно разными способами – можно дать ему увесистый шлепок по спине, а можно нежно коснуться его. Тогда что мешает нам определить положение электрона с помощью «более нежного» источника света, который бы оказывал меньшее влияние на его дальнейшее движение? С точки зрения физики XIX в. это вполне возможно. Используя все более слабую лампу (и все более чувствительный датчик светового излучения), мы можем оказывать исчезающе малое влияние на движение электрона. Но квантовая механика демонстрирует изъян в наших рассуждениях. Известно, что уменьшая интенсивность источника света, мы уменьшаем количество испускаемых фотонов. Когда мы дойдем до излучения отдельных фотонов, мы уже не сможем далее уменьшать интенсивность света без того, чтобы не выключить его совсем. Это фундаментальный квантово-механический предел «нежности» нашего исследования. Таким образом, всегда существует минимальное возмущение, которое мы вносим в движение электрона путем измерения его положения.

Что ж, все это верно. Однако закон Планка говорит, что энергия единичного фотона пропорциональна его частоте (и обратно пропорциональна длине волны). Следовательно, используя свет все меньшей и меньшей частоты (и, соответственно, все большей длины волны), мы можем делать отдельные фотоны все более «нежными». Однако и здесь есть загвоздка. Когда волна направляется на объект, получаемая информация будет достаточной для того, чтобы определить положение объекта с некоторой неустранимой погрешностью, равной длине волны. Для того чтобы получить интуитивное представление об этом важном факте, представим, что мы пытаемся определить положение большой скалы, находящейся немного ниже уровня моря, по влиянию, которое она оказывает на проходящие морские волны. Приближаясь к скале, волны образуют замечательно упорядоченную последовательность следующих одни за другими гребней и впадин. После прохождения над скалой форма волн искажается – верный признак наличия подводной скалы. Но подобно самым мелким делениям на линейке, отдельный цикл волны, образованный гребнем и впадиной, является мельчайшей единицей в последовательности волн, поэтому, если мы наблюдаем только возмущение в движении волн, мы можем определить положение скалы лишь с точностью, равной одному волновому циклу, или длине волны. В случае света составляющие его фотоны представляют собой, грубо говоря, отдельные волновые циклы (при этом высота циклов определяется числом фотонов); следовательно, при определении положения объекта фотон дает точность, равную длине волны.

Таким образом, мы сталкиваемся со своего рода квантово-механической компенсацией. Если мы используем высокочастотный свет (малой длины волны), мы можем с высокой точностью определить положение электрона. Но высокочастотные фотоны несут очень большое количество энергии и поэтому вносят большие возмущения в скорость движения электронов. Если мы используем низкочастотный свет (большой длины волны), мы

минимизируем его влияние на движение электрона, поскольку фотоны, составляющие этот свет, имеют относительно низкую энергию, но в этом случае мы вынуждены пожертвовать точностью определения положения электрона. Гейзенберг выразил все это в виде математического соотношения между точностью измерения положения электрона и точностью определения его скорости. Он установил, что эти величины обратно пропорциональны друг другу: большая точность в определении положения неизбежно ведет к большей погрешности в определении скорости, и наоборот. Что еще более важно, хотя мы и ограничили наше обсуждение одним конкретным способом определения местоположения электрона, согласно Гейзенбергу компромисс между точностью определения положения и скорости является фундаментальным фактом, который остается справедливым независимо от используемого оборудования и метода измерения. В отличие от теорий Ньютона и даже Эйнштейна, в которых движущаяся частица описывается ее положением и скоростью, согласно квантовой механике на микроскопическом уровне вы не можете знать оба этих параметра с одинаковой точностью. Более того, чем точнее вы знаете один параметр, тем больше погрешность другого. Хотя мы ограничили наше описание электронами, то же самое относится ко всем составным элементам мироздания.

Эйнштейн пытался минимизировать этот отход от позиций классической физики, утверждая, что хотя квантовая механика определенно ставит предел нашему знанию положения и скорости, электрон, тем не менее, имеет определенное положение и скорость в том смысле, который мы привыкли вкладывать в эти слова. Однако в течение последних двух десятилетий прогресс в теоретической физике, достигнутый группой исследователей, возглавляемых ирландским физиком Джоном Беллом, и экспериментальные данные Алана Аспекта и его коллег убедительно продемонстрировали, что Эйнштейн был не прав. Про электроны, как и про любые другие частицы, нельзя одновременно сказать, что они находятся в таком-то месте и имеют такую-то скорость. Квантовая механика показывает, что это утверждение не только не может быть проверено экспериментально (по причинам, объясненным выше), но оно, кроме того, прямо противоречит другим, совсем недавно полученным экспериментальным данным.

$\hbar$

$\hbar$

В действительности происходит так: если вы поместите электрон в большую коробку и затем начнете медленно сдвигать ее стенки, чтобы определить его положение с увеличивающейся точностью, вы обнаружите, что движение электрона будет становиться все более и более неистовым. Электрон, будто охваченный своего рода клаустрофобией, будет возбуждаться все сильнее – отскакивая от стенок коробки со все возрастающей и непредсказуемой скоростью. Природа не позволяет загнать в угол свои компоненты. Как вы помните, в Н-баре, где мы сделали значение гораздо большим, чем оно есть в реальном мире, чтобы квантовые эффекты могли непосредственно влиять на объекты реального мира, кубики льда в напитках Джорджа и Грейс находились в неистовом движении, как будто тоже страдали от квантовой клаустрофобии. Хотя Н-бар является фантазией – в действительности значение исчезающе мало – точно такая же квантовая клаустрофобия является неотъемлемым свойством микромира. Движение микрочастиц становится все более хаотическим, по мере того как их положение ограничивается при исследовании все меньшими областями в пространстве.

Соотношение неопределенностей лежит в основе еще одного потрясающего явления, известного под названием квантового туннелирования. Если вы выстрелите пластиковой пулей в бетонную стенку толщиной в десять футов, то результат будет полностью соответствовать и вашим интуитивным представлениям, и классической физике: пуля отскочит назад. Причина состоит в том, что у пули просто недостаточно энергии, чтобы пробить такое прочное препятствие. Однако если перейти на уровень фундаментальных частиц, то, как совершенно определенно показывает квантовая механика, в волновую функцию (или, иначе, вероятностную волну) каждой составляющей пулю частицы заложена

небольшая вероятность того, что эта частица может пройти сквозь стену. Это означает, что существует маленькая, но ненулевая, вероятность того, что пуля на самом деле сможет пройти сквозь стену и оказаться на другой стороне. Как такое может случиться? Причина снова содержится в соотношении неопределенностей Гейзенберга.

Чтобы понять это, представьте, что вы живете в полной нищете и вдруг узнаете, что ваш дальний родственник отошел в лучший мир, оставив вам огромное состояние. Единственная проблема состоит в том, что у вас нет денег для покупки билета на самолет. Вы объясняете ситуацию своим друзьям: если они помогут вам преодолеть барьер между вами и наследством, ссудив деньги на билет, вы вернете им долг с процентами после возвращения. Но ни у кого нет денег, чтобы дать вам в долг. Тут вы вспоминаете про вашего старого друга, который работает в авиакомпании, и обращаетесь к нему с той же просьбой. Он тоже не может дать вам денег взаймы, но предлагает другое решение. Система учета в авиакомпании такова, что если вы вышлете деньги в уплату за билет телеграфным переводом в течение 24 часов с момента прибытия в пункт назначения, никто не узнает, что вы не уплатили их до вылета.

Система учета в квантовой механике довольно схожа с этой. Показав, что существует компромисс между точностью измерения местоположения и скорости, Гейзенберг, кроме того, продемонстрировал существование компромисса между точностью измерения энергии и тем, сколько времени занимают эти измерения. Согласно квантовой механике вы не можете утверждать, что частица имеет в точности такую-то энергию в точно такой-то момент времени. За возрастающую точность измерения энергии приходится платить возрастающей продолжительностью проведения измерений. Грубо говоря, это означает, что энергия частицы может флуктуировать в очень широких пределах, если измерения проводятся в течение достаточно короткого периода времени. Поэтому точно так же как система учета в авиакомпании «позволяет» вам занять «деньги» на билет при условии, что вы вернете их достаточно быстро, квантовая механика «позволяет» частице «занять» энергию при условии, что она может вернуть ее в течение промежутка времени, определяемого сотношением неопределенностей Гейзенберга.

$\hbar$

$\hbar$

Математический аппарат квантовой механики показывает, что чем выше энергетический барьер, тем меньше вероятность того, что такой созидательный микроскопический переучет произойдет. Однако если говорить о микроскопических частицах, находящихся перед бетонной плитой, они имеют возможность занять достаточное количество энергии и иногда делают то, что с точки зрения классической физики является невозможным: они мгновенно проходят через область, для проникновения в которую у них раньше не хватало энергии. При переходе к более сложным объектам, состоящим из большего числа частиц, возможность квантового туннелирования сохраняется, но становится очень маловероятной, поскольку требует, чтобы все частицы совершили переход одновременно. Однако шокирующие эпизоды, подобные исчезновению сигары Джорджа, перемещению кубика льда сквозь стенку бокала и проход Джорджа и Грейс сквозь стенку бара, могут происходить. В фантастическом месте, подобном Н-бару, в котором значения велики, квантовое туннелирование является обычным делом. Однако квантовой механикой правят законы вероятности. В частности, малость значения в реальном мире означает, что если вы будете каждую секунду атаковать бетонную стену, вам придется потратить время, превышающее возраст Вселенной, прежде чем у вас появится сколько-нибудь заметный шанс пройти сквозь стену в одной из попыток. Однако, имея бесконечное терпение (и такую же продолжительность жизни), рано или поздно вы можете оказаться с другой стороны.

Соотношение неопределенностей является сердцевиной квантовой механики.

Свойства, которые кажутся нам обычно столь фундаментальными, что не вызывают никаких сомнений, – что объекты имеют определенное положение и скорость, и что в определенные моменты времени они имеют определенную энергию, – теперь

представляются всего лишь следствием того, что постоянная Планка так мала в масштабах нашего повседневного мира. Первостепенное значение имеет то, что применение этих квантовых принципов к структуре пространства-времени демонстрирует фатальное несовершенство «основ гравитации» и приводит нас к третьему и наиболее серьезному противоречию, с которым столкнулись физики в течение последнего столетия.

Глава 5. Необходимость новой теории: общая теория относительности versus квантовая механика

За последнее столетие наше понимание физического мира чрезвычайно углубилось. Теоретический аппарат квантовой механики и общей теории относительности позволил понять и предсказать доступные экспериментальной проверке физические явления, происходящие как на масштабах атомного и субатомного мира, так и на масштабах галактик, скоплений галактик и самой Вселенной в целом. Это фундаментальное достижение. Поистине вдохновляет то, что существа, обитающие на одной из планет, обращающейся вокруг заурядной звезды на окраине ничем не примечательной галактики, сумели путем размышлений и эксперимента выяснить и постичь ряд самых загадочных свойств физического мира. Тем не менее физики так устроены, что они никогда не будут удовлетворены до тех пор, пока не почувствуют, что достигли глубочайшего и наиболее фундаментального понимания Вселенной. Это то, что Стивен Хокинг назвал первым шагом к познанию «замысла Бога»1).

Существует много свидетельств того, что квантовая механика и общая теория относительности не позволяют достичь этого глубочайшего уровня понимания. Поскольку их обычные области применения столь сильно различаются, в большинстве случаев требуется использование либо квантовой механики, либо общей теории относительности, но не обеих теорий одновременно. Но в некоторых экстремальных условиях, когда тела очень массивны и одновременно чрезвычайно малы по размерам (например, вещество вблизи центра черных дыр или Вселенная в целом в момент Большого взрыва), для полного понимания требуется как общая теория относительности, так и квантовая механика. Однако, подобно встрече огня и дороха, попытка объединения квантовой механики и общей теории относительности приводит к разрушительной катастрофе. При объединении уравнений этих теорий правильно поставленные физические задачи дают бессмысленные ответы. Бессмыслица часто принимает форму прогноза, что квантово-механическая вероятность некоторых процессов равна не 20, 73 или 91 %, а бесконечности. Но что же может означать вероятность, превышающая единицу, не говоря уже о бесконечности? Мы вынуждены заключить, что здесь есть какой-то серьезный порок. Внимательно анализируя основные понятия общей теории относительности и квантовой механики, можно выяснить, что же это за порок.

Суть квантовой механики

Когда Гейзенберг открыл соотношение неопределенностей, в физике произошел резкий поворот, и назад пути нет. Вероятности, волновые функции, интерференция и кванты – все это требует радикально новых способов видения мира. Однако не исключено, что какой-нибудь твердолобый физик-«классик» продолжает держаться за тонкую нить надежды, что когда все уляжется, эти отклонения от «классики» удастся встроить в систему понятий, не слишком сильно отличающуюся от прежних представлений. Однако соотношение неопределенностей ясно и недвусмысленно отрицает любую возможность возврата к прошлому.

Соотношение неопределенностей утверждает, что при переходе к меньшим расстояниям и меньшим промежуткам времени жизнь Вселенной становится все более неистовой. Мы столкнулись с некоторыми свидетельствами этого при описании в

предыдущей главе попыток точного определения положения элементарных частиц, таких как электроны. Освещая электроны светом все возрастающей частоты, мы измеряем их положение со все большей точностью, но за это приходится платить тем, что сами измерения вносят все большие возмущения. Высокочастотные фотоны обладают большой энергией и, следовательно, дают электронам резкий «толчок», значительно изменяющий их скорости. Подобно беспорядку в комнате, полной детей, мгновенное положение которых вам известно с большой точностью, но скорость которых, точнее, величину скорости и направление перемещения, вы почти не можете контролировать, эта неспособность определить одновременно положение и скорость элементарных частиц свидетельствует об изначальной хаотичности микромира.

Хотя этот пример выражает фундаментальную связь между неопределенностью и хаосом, на самом деле он раскрывает только часть обшей картины. Например, можно было бы думать, что неопределенность возникает только тогда, когда мы – бестактные наблюдатели – вмешиваемся в происходящее на сцене мироздания. Это не верно. Пример попытки удержать электрон в небольшой коробке и его бурная реакция на это – увеличение скорости и хаотичности движения – подводит нас немного ближе к истине. Даже без «прямых столкновений» с вносящими возмущение «экспериментаторскими» фотонами скорость электрона резко и непредсказуемо изменяется от одного момента времени к другому. Но и этот пример не раскрывает все ошеломляющие свойства микромира, следующие из открытия Гейзенберга. Даже в самой спокойной ситуации, которую только можно себе представить, например, в пустой области пространства, согласно соотношению неопределенностей в микромире имеет место невероятная активность. И эта активность возрастает по мере уменьшения масштабов расстояния и времени.

В понимании этого ключевую роль играет принцип квантово-механического баланса. Мы видели в предыдущей главе, что точно так же, как вы можете занять денег, чтобы решить важные финансовые проблемы, частица (например, электрон) может временно занять энергию, чтобы преодолеть реальный физический барьер. Это так. Но квантовая механика заставляет нас углубить эту аналогию. Представьте себе маниакального заемщика, который ходит от одного приятеля к другому, прося денег взаймы. Чем короче период времени, на который приятель может дать ему деньги, тем большую сумму он просит. Занимает и отдает, занимает и отдает – снова и снова он берет деньги в долг только для того, чтобы вскоре вернуть их. Как цены на акции в те дни, когда биржа ведет себя подобно американским горкам, количество денег, которые есть у маниакального заемщика в любой заданный момент времени, испытывает чрезвычайно сильные колебания, но по завершении всех этих операций его финансовый баланс находится в том же состоянии, в котором он был в начале.

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга следует, что подобный хаотический перенос энергии и импульса непрерывно происходит во Вселенной на микроскопических расстояниях и в микроскопическом временном масштабе. Согласно соотношению неопределенностей, даже в пустых областях пространства (например, в пустой коробке) энергия и импульс являются неопределенными: они флуктуируют между крайними значениями, которые возрастают по мере уменьшения размеров коробки и временного масштаба, на котором проводятся измерения. Это выглядит так, как если бы область пространства внутри коробки являлась маниакальным «заемщиком» энергии и импульса, непрерывно беря «в долг» у Вселенной и неизменно «возвращая долг». Но что участвует в этих обменах, например, в пустой области пространства? Все. В буквальном смысле слова. Энергия (как и импульс) являются универсальной конвертируемой валютой. Формула Е = тс2 говорит нам, что энергия может превращаться в материю и наоборот. Например, если флуктуации энергии достаточно велики, они могут привести к мгновенному возникновению электрона и соответствующей ему античастицы – позитрона, даже в области, которая первоначально была пустой! Поскольку энергия должна быть быстро возвращена, данные частицы должны спустя мгновение аннигилировать, высвободив энергию, заимствованную при их создании. То же самое справедливо для всех других форм, которые могут принимать

энергия и импульс – при рождении и аннигиляции других частиц, сильных колебаниях интенсивности электромагнитного поля, флуктуациях полей сильного и слабого взаимодействий. Квантово-механическая неопределенность говорит нам, что в микроскопическом масштабе Вселенная является ареной, изобилующей бурными и хаотическими событиями. Как заметил однажды Фейнман, «возникать и аннигилировать, возникать и аннигилировать – какая пустая трата времени»2). Поскольку заем и возврат в среднем компенсируют друг друга, пустая область в пространстве продолжает выглядеть тихой и спокойной, если исследовать ее в любом масштабе, кроме микроскопического. Однако соотношение неопределенностей указывает, что макроскопическое усреднение скрывает интенсивную микроскопическую активность3). Как мы увидим вскоре, этот хаос и является препятствием к слиянию общей теории относительности и квантовой механики.

Квантовая теория поля

На протяжении 1930-х и 1940-х гг. физики-теоретики во главе с такими личностями, как Поль Дирак, Вольфганг Паули, Юлиан Швингер, Фриман Дайсон, Син-Итиро Томонага и Фейнман, не покладая рук пытались разработать математический аппарат, который помог бы справиться с буйством микромира. Они установили, что квантовое волновое уравнение Шредингера (упомянутое в главе 4) на самом деле дает только приближенное описание физики микромира. Это приближенное описание работает очень хорошо, пока вы не пытаетесь (экспериментально или теоретически) слишком глубоко залезть в микроскопический хаос, но определенно отказывается работать, если кто-то делает такую попытку.

Основным разделом физики, которым Шредингер пренебрег в своей формулировке квантовой механики, была специальная теория относительности. На самом деле Шредингер сначала сделал попытку включить специальную теорию относительности, но полученное в результате квантовое уравнение давало предсказания, находившиеся в противоречии с экспериментальными данными для атома водорода. Это побудило Шредингера воспользоваться широко применяемым в физике подходом «разделяй и властвуй»: вместо того, чтобы пытаться одним махом объединить в новой теории все, что известно о физическом мире, часто гораздо выгоднее бывает делать небольшие шаги, которые последовательно включают новейшие открытия, сделанные на переднем крае исследований. Шредингер искал и нашел математический аппарат, который позволил учесть экспериментально подтвержденный корпускулярно-волновой дуализм, но он не смог на этой стадии включить в рассмотрение специальную теорию относительности4).

Однако вскоре физики осознали, что специальная теория относительности крайне важна для корректной формулировки законов квантовой механики. Хаос микромира требует признания, что энергия может проявлять себя самыми различными способами. Впервые это было осознано в формуле специальной теории относительности Е = тс2. Игнорируя специальную теорию относительности, подход Шредингера не учитывал взаимопревращаемость материи, энергии и движения.

Прежде всего физики сконцентрировали свои усилия на попытках объединить специальную теорию относительности с принципами квантовой механики при описании электромагнитного поля и его взаимодействия с веществом. В результате серии вдохновляющих достижений они создали квантовую электродинамику. Это был пример теории, впоследствии получившей название релятивистской квантовой теории поля или, кратко, квантовой теории поля. Такая теория является квантовой, поскольку она с самого начала строилась с использованием понятий вероятности и неопределенности; она является теорией поля, поскольку объединяет понятия квантовой механики и ранее существовавшее классическое представление о силовом поле, и данном случае, максвелловском электромагнитном поле. Наконец, эта теория является релятивистской, поскольку с самого начала учитывает специальную теорию относительности. (Если вам нужен визуальный образ

квантового поля, вы можете использовать образ классического поля, скажем, океан невидимых силовых линий, пронизывающих пространство, дополнив его в двух отношениях. Во-первых, вы должны представить квантовое поле образованным из частиц-составляющих, таких как фотоны в случае электромагнитного поля. Во-вторых, вы должны представить, что энергия, сосредоточенная в массах частиц и их движении, бесконечно много раз переходит от одного квантового поля к другому в процессе их непрерывных осцилляции в пространстве и времени.)

Квантовая электродинамика, бесспорно, является наиболее точной из когда-либо созданных теорий, описывающих природные явления. Иллюстрацию ее точности можно найти в работах Тойхиро Киношиты, специалиста по физике элементарных частиц из Корнелльского университета, который в течение последних 30 лет неутомимо использовал квантовую электродинамику для расчета некоторых тонких свойств электронов. Расчеты Киношиты заполняют тысячи страниц, и в конце концов потребовали для завершения самых мощных из когда-либо созданных компьютеров. Но затраченные им усилия принесли свои плоды, позволив рассчитать характеристики электронов, которые подтвердились экспериментально с точностью, превышающей одну миллиардную. Это согласие между результатами абстрактных теоретических вычислений и данными реального мира совершенно поразительно. С помощью квантовой электродинамики физики смогли подтвердить роль фотонов как «наименьших возможных сгустков света» и описать их взаимодействие с электрически заряженными частицами в рамках математически законченной модели, позволяющей получать убедительные предсказания.

Успех квантовой электродинамики побудил других физиков в 1960-х и 1970-х гг. попытаться использовать аналогичный подход для квантово-механического описания слабого, сильного и гравитационного взаимодействий. Для слабого и сильного взаимодействий этот подход оказался чрезвычайно плодотворным. Физики сумели, по аналогии с квантовой электродинамикой, разработать квантово-полевые теории сильного и слабого взаимодействий, получившие название квантовой хромодинамики и квантовой теории электрослабых взаимодействий. Название «квантовая хромодинамика» выбрано из-за колорита, более логичным было бы «квантовая динамика сильных взаимодействий», но это всего лишь название без глубокого смысла. С другой стороны, название «электрослабое» указывает на важную веху в нашем понимании взаимодействий в природе. В работе, за которую Шелдон Глэшоу, Абдус Салам и Стивен Вайнберг получили Нобелевскую премию, они показали, что слабое и электромагнитное взаимодействия естественным образом объединяются в квантово-полевом описании, несмотря на то, что их проявления в окружающем нас мире столь разительно различаются. Слабое взаимодействие имеет исчезающе малую величину во всех масштабах, кроме субатомного, тогда как электромагнитные поля – видимый свет, радио– и телевизионные сигналы, рентгеновское излучение – неоспоримо присутствуют в нашем макроскопическом мире. Тем не менее, Глэшоу, Салам и Вайнберг показали, что при достаточно высоких энергиях и температурах, которые существовали спустя долю секунды после Большого взрыва, электромагнитное и слабое взаимодействия были слиты одно с другим, их характеристики были неразличимы. Поэтому им дали более точное название электрослабых взаимодействий. Вследствие не прекращающегося со времен Большого взрыва снижения температуры из единого высокотемпературного состояния разными путями выкристаллизовались электромагнитное и слабое взаимодействия в ходе процесса, известного под названием нарушение симметрии, который мы опишем ниже. В результате эти взаимодействия приобрели различный облик в той холодной Вселенной, в которой мы обитаем в настоящее время.

Итак, если вы следите за хронологией, к 1970-м гг. физики разработали успешное квантово-механическое описание трех из четырех взаимодействий (сильного, слабого и электромагнитного), а также показали, что два из трех последних (слабое и электромагнитное взаимодействия) фактически имеют общее происхождение (электрослабое взаимодействие). В течение последних десятилетий физики подвергли это

квантово-механическое описание трех негравитационных сил (как они взаимодействуют между собой и с введенными в главе 1 частицами материи) самой разнообразной экспериментальной проверке. Теория с успехом выдержала нее проверки. Когда экспериментаторы измерили значения 19 параметров (масс частиц, приведенных в табл. 1.1, констант взаимодействия для этих частиц, показанных в таблице и примечании 1 к главе 1, интенсивностей трех негравитационных взаимодействий в табл. 1.2, а также ряда других величин, обсуждать которые нет необходимости), а теоретики подставили полученные значения в формулы квантово-полевых теорий для сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий частиц материи, предсказания этих теорий с поразительной точностью совпали с экспериментальными данными. Совпадение наблюдается вплоть до энергий, способных расщепить материю на частицы, размер которых составляет одну миллиардную от одной миллиардной метра, что является пределом для современного уровня развития техники. По этой причине физики называют теорию трех негравитационных взаимодействий и три семейства частиц материи стандартной теорией, или (чаще) стандартной моделью физики элементарных частиц.

Частицы-посланники

Так же, как для электромагнитного поля, наименьшим элементом которого является фотон, для полей сильного и слабого взаимодействий согласно стандартной модели имеются свои наименьшие элементы. Как упоминалось в главе I, мельчайшие сгустки сильного взаимодействия известны под названием глюонов, а соответствующие сгустки слабого взаимодействия – под названием калибровочных бозонов слабого взаимодействия (точнее, W-бозонов и Z-бозонов). Стандартная модель предписывает нам рассматривать эти сгустки как не имеющие внутренней структуры – в рамках данной модели они столь же элементарны, как частицы, входящие в состав трех семейств частиц материи.

Фотоны, глюоны и калибровочные бозоны слабого взаимодействия обеспечивают микроскопический механизм передачи взаимодействий, которые они представляют. Например, чтобы представить себе, как одна электрически заряженная частица отталкивает другую частицу с одноименным зарядом, можно вообразить, что каждая частица окружена электрическим полем – «облаком» или «туманом», являющимся носителем «электрических свойств», – а воздействие, воспринимаемое каждой частицей, обусловлено взаимодействием их силовых полей. Более точное описание отталкивания частиц на микроскопическом уровне выглядит несколько иначе. Электромагнитное поле состоит из полчищ фотонов; взаимодействие между двумя заряженными частицами на самом деле является результатом взаимного «обстрела» фотонами. Если использовать грубую аналогию, это похоже на изменение траекторий двух конькобежцев, обстреливающих друг друга градом шаров для боулинга. Подобным же образом и две электрически заряженные частицы влияют друг на друга, обмениваясь мельчайшими частицами света.

Существенным недостатком аналогии с конькобежцами является то, что обмен шарами для боулинга всегда приводит к «отталкиванию»: он увеличивает расстояние между конькобежцами. С другой стороны, две частицы, несущие противоположный заряд, также взаимодействуют между собой, обмениваясь фотонами, но результирующая электромагнитная сила является притягивающей. Это выглядит так, как если бы фотон был переносчиком не взаимодействия как такового, а скорее послания о том, как получатель должен реагировать на соответствующее взаимодействие. Частицам, несущим одноименный заряд, фотон передает сообщение «отдаляйтесь», а частицам с разноименным зарядом – «сближайтесь». По этой причине фотон иногда называют частицей-посланником электромагнитного взаимодействия. Аналогичным образом глюоны и слабые калибровочные бозоны являются частицами-посланниками сильного и слабого атомного взаимодействия. Сильное взаимодействие, которое удерживает кварки внутри протонов и нейтронов, возникает за счет обмена глюонами между кварками. Можно сказать, что глюоны создают

«клей», удерживающий эти субатомные частицы вместе. Слабое взаимодействие, отвечающее за некоторые виды превращений частиц при радиоактивном распаде, передается посредством калибровочных бозонов слабого взаимодействия.

Калибровочная симметрия

Вы, наверное, уже заметили, что в нашем обсуждении квантовой теории взаимодействий в природе не упоминается гравитация. Зная, что у физиков имеется подход, который они успешно использовали для трех других взаимодействий, вы можете ожидать, что они пытались разработать квантово-полевую теорию гравитационного взаимодействия, в которой частицей, передающей гравитационное взаимодействие, будет наименьший сгусток гравитационного поля, гравитон. На первый взгляд это предположение кажется особенно уместным в силу того, что квантовая теория трех негравитационных взаимодействий выявила волнующее сходство между ними и свойством гравитационного поля, с которыми мы столкнулись в главе 3.

Вспомним, что гравитационное взаимодействие позволяет объявить, что все наблюдатели – независимо от состояния движения – являются абсолютно равноправными. Даже те, движение которых кажется нам ускоренным, могут заявить, что находятся в состоянии покоя, поскольку могут приписать испытываемую ими силу действию гравитационного поля. В этом смысле гравитация налагает симметрию: она гарантирует равноправие всех возможных точек зрения и всех возможных систем отсчета. Сходство с сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями состоит в том, что они тоже связаны с симметриями, хотя эти виды симметрии значительно более абстрактны по сравнению с той, которая связана с гравитацией.

Для того чтобы получить общее представление об этих достаточно тонких принципах симметрии, рассмотрим один важный пример. Как указано в таблице, содержащейся в примечании 1 к главе 1, каждый кварк может быть окрашен в один из трех «цветов» (вычурно названных красным, зеленым и синим, хотя это не более чем условность и не имеет никакого отношения к цвету в обычном понимании этого слова). Эти цвета определяют его реакцию на сильное взаимодействие точно так же, как электрический заряд определяет реакцию на электромагнитное взаимодействие. Все полученные к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что между кварками наблюдается симметрия: все взаимодействия между одноцветными кварками (красного с красным, зеленого с зеленым или синего с синим) являются идентичными, как и идентичными являются взаимодействия между разноцветными кварками (красного с зеленым, зеленого с синим или синего с красным). На самом деле факты еще более поразительны. Если три цвета, т. е. три различных сильных заряда, сдвинуть определенным образом (грубо говоря, если на нашем вычурном цветовом языке красный, зеленый и синий изменятся и станут, например, желтым, индиго и фиолетовым), то даже если параметры сдвига будут меняться от одного момента времени к другому и от точки к точке, взаимодействие между кварками останется совершенно неизменным. Рассмотрим сферу: она является примером тела, обладающего вращательной симметрией, поскольку выглядит одинаково независимо от того, как мы вращаем ее в руках и под каким углом на нее смотрим. Аналогично можно сказать, что наша Вселенная обладает симметрией сильного взаимодействия: физические явления не изменятся при сдвигах зарядов этого взаимодействия – Вселенная совершенно не чувствительна к ним. По историческим причинам физики говорят, что симметрия сильного взаимодействия является примером калибровочной симметрии5).

Здесь следует подчеркнуть один существенный момент. Как показали работы Германа Вейля 1920-х гг., а также работы Чень-Нин Янга и Роберта Миллса 1950-х гг., аналогично тому, что симметрия между всеми возможными точками наблюдения в общей теории относительности требует существования гравитационной силы, калибровочная симметрия требует существования других видов сил. Подобно тому, как чувствительная система

контроля параметров окружающей среды поддерживает на постоянном уровне температуру, давление и влажность воздуха путем компенсации внешних воздействий, некоторые типы силовых полей, согласно Янгу и Миллсу, обеспечивают компенсацию сдвигов зарядов сил, сохраняя неизменность физических взаимодействий между частицами. В случае калибровочной симметрии, связанной со сдвигом цветовых зарядов кварков, требуемая сила представляет собой не что иное, как само сильное взаимодействие. Иными словами, если бы не было сильного взаимодействия, физика могла бы измениться при упомянутом выше сдвиге цветовых зарядов. Это показывает, что хотя гравитационное и сильное взаимодействия имеют совершенно различные свойства (вспомним, например, что гравитация гораздо слабее сильного взаимодействия и действует на гораздо больших расстояниях), они, в определенном смысле, имеют общее происхождение: каждое из них необходимо для того, чтобы Вселенная обладала какой-то конкретной симметрией. Более того, аналогичные рассуждения, примененные к слабому и электромагнитному взаимодействиям, показывают, что их существование также связано с некоторыми видами калибровочной симметрии – так называемой слабой и электромагнитной калибровочной симметриями. Таким образом, все четыре взаимодействия непосредственно связаны с принципами симметрии.

Эта общая характеристика всех четырех взаимодействий, казалось бы, говорит в пользу предположения, сделанного в начале настоящего раздела. А именно, в наших попытках объединить квантовую механику и общую теорию относительности мы должны вести поиск в направлении квантово-полевой теории гравитационного взаимодействия, следуя примеру успешной разработки квантово-полевых теорий трех других видов взаимодействия. На протяжении многих лет эта логика вдохновляла группу выдающихся физиков на разработку такой теории, однако путь к ней оказался усеян препятствиями, и никому не удалось пройти его полностью. Попытаемся понять почему.

Общая теория относительности и квантовая механика

Обычной областью применения общей теории относительности являются огромные, астрономические масштабы расстояний. Согласно теории Эйнштейна, на этих масштабах отсутствие масс означает, что пространство является плоским, как показано на рис. 3.3. Пытаясь объединить общую теорию относительности и квантовую механику, мы должны резко изменить фокусировку и исследовать свойства пространства в микроскопическом масштабе. Мы продемонстрировали это на рис. 5.1 путем последовательного увеличения масштаба и перехода к уменьшающимся областям пространства. По мере того, как мы увеличиваем масштаб, на первых порах не происходит ничего особенного; можно видеть, что на первых трех уровнях увеличения на рис. 5.1 структура пространства сохраняет свои основные свойства. Если подходить с сугубо классической точки зрения, мы могли бы рассчитывать на то, что такая спокойная и плоская структура пространства будет сохраняться все время, вплоть до любого, произвольно малого масштаба расстояний. Однако квантовая механика радикально меняет эту картину. Объектом квантовых флуктуации, управляемых соотношением неопределенностей, является все – даже гравитационное поле.

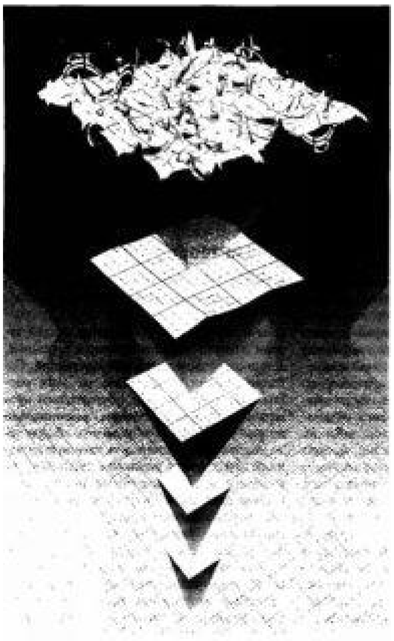

Рис. 5.1. Рассматривая область пространства при все большем увеличении, можно исследовать свойства пространства на ультрамикроскопическом уровне. Попытки объединить общую теорию относительности и квантовую механику наталкиваются на кипящую квантовую пену, проявляющуюся при самом большом увеличении

Хотя классическая теория говорит, что гравитационное поле в пустом пространстве равно нулю, квантовая механика показывает, что оно будет нулевым в среднем, а его текущее значение будет изменяться за счет квантовых флуктуаций. Более того, соотношение неопределенностей говорит нам, что размер флуктуации гравитационного поля будет возрастать при переходе ко все меньшим областям пространства. Квантовая механика показывает, что никому не нравится, когда его загоняют в угол; уменьшение пространственной фокусировки ведет к росту флуктуаций. Поскольку гравитационное поле проявляется в кривизне пространства, эти квантовые флуктуации выражаются в его чудовищных деформациях. Мы можем наблюдать проявление таких деформаций на четвертом уровне увеличения на рис. 5.1. При переходе к еще меньшему масштабу расстояний, такому, как на пятом уровне рис. 5.1, мы видим, что случайные квантово-механические флуктуации гравитационного поля соответствуют такому сильному искривлению пространства, что оно совсем перестает напоминать мягко искривленные геометрические объекты типа резиновой пленки, которую мы использовали в качестве аналогии в главе 3. Скорее оно принимает вспененную, турбулентную и скрученную форму, показанную в верхней части рисунка. Джон Уилер предложил для описания такого хаоса, обнаруживаемого при изучении ультрамикроскопической структуры пространства (и времени), термин квантовая пена' – описывающий незнакомую нам область Вселенной, в которой обычные понятия «налево и направо», «вперед и назад», «вверх и вниз» (и даже «до и после») теряют свой смысл. Именно на таких малых расстояниях мы сталкиваемся с фундаментальной несовместимостью общей теории относительности и квантовой механики. Понятие гладкости геометрии пространства, являющееся основным принципом общей теории относительности, рушится под напором неистовых флуктуации квантового мира, существующих в масштабе ультрамикроскопических расстояний. В ультрамикроскопическом масштабе основное свойство квантовой механики – соотношение неопределенностей – вступает в прямое противоречие с центральным принципом обшей теории относительности – гладкой геометрической моделью пространства (и пространства-времени).

На практике этот конфликт проявляется в весьма конкретном виде. Расчеты, основанные на совместном использовании уравнений общей теории относительности и квантовой механики, обычно дают один и тот же нелепый ответ: бесконечность. Подобно

подзатыльнику, полученному от школьного учителя старых времен, бесконечность в ответе – это способ, с помощью которого природа сообщает, что мы делаем что-то не так, как надо6). Уравнения общей теории относительности не могут справиться с безумным хаосом квантовой пены.

Заметим, однако, что по мере того, как мы возвращаемся к обычным масштабам расстояний (проходя последовательность на рис. 5.1 в обратном порядке), неистовые случайные колебания, свойственные микроскопическим расстояниям, начинают гасить друг друга. В результате (точно так же, как среднее по банковскому счету нашего маниакального заемщика не обнаруживает никаких признаков его мании) понятие гладкости геометрии нашего пространства вновь становится точным. Это похоже на растровый рисунок в книге или газете: при взгляде издалека точки, образующие рисунок, сливаются и создают впечатление гладкого изображения, в котором вариации яркости плавно и незаметно изменяются от участка к участку. Однако если вы посмотрите на этот рисунок с более близкого расстояния, вы увидите, что он совсем не так гладок, как выглядит издалека. На самом деле он представляет собой набор дискретных точек, каждая из которых четко отделяется от других. Однако обратите внимание, что вы смогли узнать о дискретности рисунка, только рассмотрев его вблизи: издалека он выглядит гладким. Точно так же и структура пространства-времени кажется нам гладкой, за исключением тех случаев, когда мы исследуем ее с ультрамикроскопическим разрешением. Это объясняет, почему общая теория относительности работает на достаточно крупных масштабах расстояний (и времен), которые свойственны многим типичным астрономическим явлениям, но оказывается непригодной на микроскопических масштабах пространства (и времени). Центральный принцип гладкой и слабо искривленной геометрии соблюдается в большом масштабе, но нарушается под действием квантовых флуктуации при переходе к микроскопическим масштабам.

Основные принципы общей теории относительности и квантовой механики позволяют рассчитать примерный масштаб расстояний, при переходе к которому становятся очевидными разрушительные явления, показанные на рис. 5.1. Малость постоянной Планка, которая управляет интенсивностью квантовых эффектов, и слабость константы гравитационного взаимодействия приводят к тому, что планковская длина, куда входят обе этих величины, имеет малость, которая превосходит всякое воображение: одна миллионная от одной миллиардной от миллиардной от миллиардной доли сантиметра (10~33)7). Таким образом, пятый уровень на рис. 5.1 схематически изображает структуру Вселенной в ультрамикроскопическом, субпланковском масштабе расстояний. Чтобы дать представление о масштабах, приведем такую иллюстрацию: если мы увеличим атом до размеров Вселенной, то планковская длина станет равной высоте среднего дерева. Итак, мы видим, что несовместимость общей теории относительности и квантовой механики проявляется только в очень глубоко запрятанном королевстве Вселенной. У читателя может возникнуть вопрос, стоит ли вообще беспокоиться по этому поводу. Мнение физического сообщества по этому вопросу отнюдь не является единым. Есть физики, которые признают существование проблемы, но предпочитают применять квантовую механику и общую теорию относительности для решения таких задач, в которых типичные расстояния намного превосходят планковскую длину. Есть, однако, и другие ученые, которые глубоко обеспокоены тем фактом, что два фундаментальных столпа, на которых держится здание современной физики, в своей основе принципиально несовместимы, и неважно, что эта несовместимость проявляется только на ультрамикроскопическом масштабе расстояний. Несовместимость, говорят они, указывает на существенный изъян в нашем понимании физического мира. Это мнение основывается на недоказуемой, но глубоко прочувствованной точке зрения, согласно которой понимание Вселенной на ее самом глубоком и наиболее элементарном уровне может дать нам ее логически непротиворечивое описание, все детали которого будут находиться в гармоничном единстве. И уж точно большинство физиков, независимо от того, какое значение это противоречие имеет для их собственных

исследований, согласятся с тем, что основа наших самых глубоких теоретических представлений о Вселенной не должна представлять собой математически противоречивое лоскутное одеяло, скроенное из двух мощных, но конфликтующих теорий.

Физики неоднократно предпринимали попытки модифицировать общую теорию относительности и квантовую механику, чтобы разрешить это противоречие, однако эти попытки, среди которых были очень дерзкие и остроумные, терпели провал за провалом.

Так продолжалось до создания теории суперструн8).

Часть III. КОСМИЧЕСКАЯ СИМФОНИЯ

Глава 6 Только музыка, или Суть теории суперструн

С давних времен музыка является источником метафорических образов для тех, кто пытается разгадать тайны Вселенной. Начиная с «музыки сфер» древних пифагорейцев и до «гармонии мира», на протяжении столетий направляющих наши научные поиски, мы пытаемся понять песнь природы в величественных хороводах небесных тел и неистовой пляске субатомных частиц. С открытием теории суперструн музыкальные метафоры приобрели удивительную реальность, поскольку согласно этой теории микромир заполнен крошечными струнами, звучание которых оркеструет эволюцию мироздания. Согласно теории суперструн ветры перемен дуют через эолову арфу Вселенной.

В противоположность этому стандартная модель представляет элементарные компоненты мироздания в виде точечных образований, лишенных какой-либо внутренней структуры. Несмотря на необыкновенную мощь (как мы уже упоминали, практически все предсказания стандартной модели о свойствах микромира подтвердились с точностью до одной миллиардной от одной миллиардной доли метра, что представляет собой предел разрешающей способности современной техники), стандартная модель не смогла стать полной или «окончательной теорией», поскольку она не включает гравитационного взаимодействия. Более того, все попытки включить гравитацию в квантово-механическую формулировку этой модели закончились неудачей из-за неистовых флуктуации структуры пространства, проявляющихся на ультрамикроскопических расстояниях, т. е. на расстояниях, меньших планковской длины. Это неразрешенное противоречие явилось побудительным мотивом для поиска более глубокого понимания природы. В 1984 г. физик Майкл Грин, работавший в то время в колледже Королевы Марии, и Джон Шварц из Калифорнийского технологического института впервые представили убедительные доказательства того, что теория суперструн (или, кратко, теория струн) может дать такое понимание.

Теория струн предлагает оригинальное и глубокое изменение теоретического описания свойств Вселенной на ультрамикроскопическом уровне – изменение, которое, как постепенно осознают физики, модифицирует эйнштейновскую общую теорию относительности, делая ее полностью совместимой с законами квантовой механики. Согласно теории струн элементарные компоненты Вселенной не являются точечными частицами, а представляют собой крошечные одномерные волокна, подобные бесконечно тонким, непрерывно вибрирующим резиновым лентам. Здесь важно не дать названию ввести нас в заблуждение. В отличие от обычных струн, состоящих из молекул и атомов, струны, о которых говорит теория струн, лежат глубоко в самом сердце материи. Теория струн утверждает, что именно они представляют собой ультрамикроскопические компоненты, из которых состоят частицы, образующие атомы. Струны, являющиеся объектом теории струн, столь малы – в среднем их размер сопоставим с планковской длиной, – что даже при изучении с помощью самого мощного оборудования они выглядят точечными.

Однако уже простая замена точечных частиц струнами в качестве фундаментальных компонентов мироздания ведет к далеко идущим последствиям. Первое и самое главное состоит в том, что теория струн, по-видимому, разрешает противоречие между общей

теорией относительности и квантовой механикой. Как мы увидим ниже, пространственная протяженность струн является новым ключевым звеном, позволяющим создать единую гармоничную систему, объединяющую обе теории. Во-вторых, теория струн действительно представляет объединенную теорию, поскольку в ней все вещество и все взаимодействия обязаны своим происхождением одной фундаментальной величине – колеблющейся струне. Наконец, как будет показано более подробно в последующих главах, помимо этих блестящих достижений, теория струн еще раз радикально изменяет наши представления о пространстве-времени1).

Краткая история теории струн

В 1968 г. молодой физик-теоретик Габриэле Венециано корпел над осмыслением многочисленных экспериментально наблюдаемых характеристик сильного ядерного взаимодействия. Венециано, который в то время работал в ЦЕРНе, Европейской ускорительной лаборатории, находящейся в Женеве (Швейцария), трудился над этой проблемой в течение нескольких лет, пока однажды его не осенила блестящая догадка. К большому своему удивлению он понял, что экзотическая математическая формула, придуманная примерно за двести лет до этого знаменитым швейцарским математиком Леонардом Эйлером в чисто математических целях – так называемая бета-функция Эйлера, – похоже, способна описать одним махом все многочисленные свойства частиц, участвующих в сильном ядерном взаимодействии. Подмеченное Венециано свойство давало мощное математическое описание многим особенностям сильного взаимодействия; оно вызвало шквал работ, в которых бета-функция и ее различные обобщения использовались для описания огромных массивов данных, накопленных при изучении столкновений частиц по всему миру. Однако в определенном смысле наблюдение Венециано было неполным. Подобно зазубренной наизусть формуле, используемой студентом, который не понимает ее смысла или значения, бета-функция Эйлера работала, но никто не понимал почему. Это была формула, которая требовала объяснения. Положение дел изменилось в 1970 г., когда Йохиро Намбу из Чикагского университета, Хольгер Нильсен из института Нильса Бора и Леонард Сасскинд из Станфордского университета смогли выявить физический смысл, скрывавшийся за формулой Эйлера. Эти физики показали, что при представлении элементарных частиц маленькими колеблющимися одномерными струнами сильное взаимодействие этих частиц в точности описывается с помощью функции Эйлера. Если отрезки струн являются достаточно малыми, рассуждали эти исследователи, они по-прежнему будут выглядеть как точечные частицы, и, следовательно, не будут противоречить результатам экспериментальных наблюдений. Хотя эта теория была простой и интуитивно привлекательной, вскоре было показано, что описание сильного взаимодействия с помощью струн содержит изъяны. В начале 1970-х гг. специалисты по физике высоких энергий смогли глубже заглянуть в субатомный мир и показали, что ряд предсказаний модели, основанной на использовании струн, находится в прямом противоречии с результатами наблюдений. В то же время параллельно шло развитие квантово-полевой теории – квантовой хромодинамики, – в которой использовалась точечная модель частиц. Успехи этой теории в описании сильного взаимодействия привели к отказу от теории струн.

Большинство специалистов по физике элементарных частиц полагали, что теория струн навсегда отправлена в мусорный ящик, однако ряд исследователей сохранили ей верность. Шварц, например, ощущал, что «математическая структура теории струн столь прекрасна и имеет столько поразительных свойств, что, несомненно, должна указывать на что-то более глубокое»2). Одна из проблем, с которыми физики сталкивались в теории струн, состояла в том, что она, как казалось, предоставляла слишком богатый выбор, что сбивало с толку. Некоторые конфигурации колеблющихся струн в этой теории имели свойства, которые напоминали свойства глюонов, что давало основание действительно считать ее теорией сильного взаимодействия. Однако помимо этого в ней содержались дополнительные

частицы-переносчики взаимодействия, не имевшие никакого отношения к экспериментальным проявлениям сильного взаимодействия. В 1974 г. Шварц и Джоэль Шерк из французской Высшей технической школы сделали смелое предположение, которое превратило этот кажущийся недостаток в достоинство. Изучив странные моды колебаний струн, напоминающие частицы-переносчики, они поняли, что эти свойства удивительно точно совпадают с предполагаемыми свойствами гипотетической частицы-переносчика гравитационного взаимодействия – гравитона. Хотя эти «мельчайшие частицы» гравитационного взаимодействия до сих пор так и не удалось обнаружить, теоретики могут уверенно предсказать некоторые фундаментальные свойства, которыми должны обладать эти частицы. Шерк и Шварц обнаружили, что эти характеристики в точности реализуются для некоторых мод колебаний. Основываясь на этом, они предположили, что первое пришествие теории струн закончилось неудачей из-за того, что физики чрезмерно сузили область ее применения. Шерк и Шварц объявили, что теория струн – это не просто теория сильного взаимодействия, это квантовая теория, которая, помимо всего прочего, включает гравитацию3).

Физическое сообщество отреагировало на это предположение весьма сдержанно. В действительности, по воспоминаниям Шварца, «наша работа была проигнорирована всеми»4). Пути прогресса уже были основательно захламлены многочисленными провалившимися попытками объединить гравитацию и квантовую механику. Теория струн потерпела неудачу в своей первоначальной попытке описать сильное взаимодействие, и многим казалось бессмысленным пытаться использовать ее для достижения еще более великих целей. Последующие, более детальные исследования конца 1970-х и начала 1980-х гг. показали, что между теорией струн и квантовой механикой возникают свои, хотя и меньшие по масштабам, противоречия. Создавалось впечатление, что гравитационная сила вновь смогла устоять перед попыткой встроить ее в описание мироздания на микроскопическом уровне.

Так было до 1984 г. В своей статье, сыгравшей поворотную роль и подытожившей более чем десятилетние интенсивные исследования, которые по большей части были проигнорированы или отвергнуты большинством физиков, Грин и Шварц установили, что незначительное противоречие с квантовой теорией, которым страдала теория струн, может быть разрешено. Более того, они показали, что полученная в результате теория обладает достаточной широтой, чтобы охватить все четыре вида взаимодействий и все виды материи. Весть об этом результате распространилась по всему физическому сообществу: сотни специалистов по физике элементарных частиц прекращали работу над своими проектами, чтобы принять участие в штурме, который казался последней теоретической битвой в многовековом наступлении на глубочайшие основы мироздания.

Я начал работу в аспирантуре Оксфордского университета в октябре 1984 г. Хотя я был восхищен раскрывавшимися передо мной достижениями квантовой теории поля, калибровочной теории и общей теории относительности, среди моих старших коллег-аспирантов было распространено скептическое убеждение, что большая часть открытий физики элементарных частиц уже сделана. Была разработана стандартная модель, и замечательный успех, с которым она предсказывала результаты экспериментов, оставлял мало сомнений в том, что ее полное подтверждение является делом не слишком отдаленного будущего. Выход за ее пределы для включения гравитации и возможного объяснения экспериментальных данных, на которых базируется эта модель (т.е. 19 чисел, характеризующих массы элементарных частиц, их константы взаимодействия и относительную интенсивность взаимодействий, известных из результатов экспериментов, но не объясненных теоретически), казался такой непосильной задачей, что лишь самые бесстрашные исследователи отваживались принять этот вызов. Однако спустя всего шесть месяцев настроения радикально изменились. Весть об успехе Грина и Шварца, в конце концов, дошла даже до аспирантов первого года обучения, и на смену прежнему унынию пришло возбуждающее ощущение причастности к поворотному моменту в истории физики.

Многие из нас засиживались глубоко за полночь, штудируя увесистые фолианты по теоретической физике и абстрактной математике, знание которых необходимо для понимания теории струн.

Период с 1984 по 1986 гг. теперь известен как «первая революция в теории суперструн». В течение этого периода физиками всего мира было написано более тысячи статей по теории струн. Эти работы окончательно продемонстрировали, что многочисленные свойства стандартной модели, открытые в течение десятилетий кропотливых исследований, естественным образом вытекают из величественной системы теории струн. Как заметил Майкл Грин, «момент, когда вы знакомитесь с теорией струн и осознаете, что почти все основные достижения физики последнего столетия следуют – и следуют с такой элегантностью – из столь простой отправной точки, ясно демонстрирует вам всю невероятную мощь этой теории»5'. Более того, для многих из этих свойств, как мы увидим ниже, теория струн дает гораздо более полное и удовлетворительное описание, чем стандартная модель. Эти достижения убедили многих физиков, что теория струн способна выполнить свои обещания и стать окончательной объединяющей теорией.

Однако на этом пути занимавшиеся теорией струн физики снова и снова натыкались на серьезные препятствия. В теоретической физике часто приходится иметь дело с уравнениями, которые либо слишком сложны для понимания, либо с трудом поддаются решению. Обычно в такой ситуации физики не пасуют и пытаются получить приближенное решение этих уравнений. Положение дел в теории струн намного сложнее. Даже сам вывод уравнений оказался столь сложным, что до сих пор удалось получить лишь их приближенный вид. Таким образом, физики, работающие в теории струн, оказались в ситуации, когда им приходится искать приближенные решения приближенных уравнений. После нескольких лет поражающего воображение прогресса, достигнутого в течение первой революции теории суперструн, физики столкнулись с тем, что используемые приближенные уравнения оказались неспособными дать правильный ответ на ряд важных вопросов, тормозя тем самым дальнейшее развитие исследований. Не имея конкретных идей по выходу за рамки этих приближенных методов, многие физики, работавшие в области теории струн, испытали растущее чувство разочарования и вернулись к своим прежним исследованиям. Для тех, кто остался, конец 1980-х и начало 1990-х гг. были периодом испытаний. Красота и потенциальная мощь теории струн манили исследователей подобно золотому сокровищу, надежно запертому в сейфе, видеть которое можно лишь через крошечный глазок, но ни у кого не было ключа, который выпустил бы эти дремлющие силы на свободу. Долгий период «засухи» время от времени прерывался важными открытиями, но всем было ясно, что требуются новые методы, которые позволили бы выйти за рамки уже известных приближенных решений.

Конец застою положил захватывающий дух доклад, сделанным Эдвардом Виттеном в 1995 г. на конференции по теории струн в университете Южной Калифорнии – доклад, который ошеломил аудиторию, до отказа заполненную ведущими физиками мира. В нем он обнародовал план следующего этапа исследований, положив тем самым начало «второй революции в теории суперструн». Сейчас специалисты по теории струн энергично работают над новыми методами, которые обещают преодолеть встреченные препятствия. Трудности, которые лежат впереди, будут серьезным испытанием для ученых, работающих в этой области, но в результате свет в конце тоннеля, хотя еще и отдаленный, может стать видимым.

В этой и в нескольких последующих главах мы опишем открытия теории струн, явившиеся результатом первой революции и поздних исследований, выполненных до начала второй революции. Время от времени мы будем упоминать достижения, сделанные в ходе второй революции; подробное описание этих новейших достижений будет приведено в главах 12 и 13.

Снова атомы в духе древних греков?

Как мы говорили в начале данной главы, и как показано на рис. 1.1, теория струн утверждает, что если бы мы могли исследовать точечные частицы, существование которых предполагает стандартная модель, с точностью, выходящей далеко за пределы наших современных возможностей, мы бы увидели, что каждая из этих частиц представляет собой крошечную колеблющуюся струну, имеющую форму петли.

По причинам, которые станут ясны в дальнейшем, длина типичной петли, образованной струной, близка к планковской длине, которая примерно в сто миллиардов миллиардов раз (1020) меньше размера атомного ядра. Неудивительно, что современные эксперименты не могут подтвердить струнную природу материи: размеры струн бесконечно малы даже в масштабе субатомных частиц. Для получения прямого подтверждения того, что струна не является точечной частицей, нам потребовался бы ускоритель, способный сталкивать частицы с энергией, в несколько миллионов миллиардов раз превышающей максимальный уровень, достигнутый на сегодняшний день.

Вскоре мы опишем ошеломляющие выводы, следующие из замены точечных частиц струнами, но сначала давайте рассмотрим более фундаментальный вопрос: из чего состоят струны?

Есть два возможных ответа на этот вопрос. Во-первых, струны действительно являются фундаментальными объектами – они представляют собой «атомы», неделимые компоненты в самом истинном смысле этого понятия, предложенного древними греками. Как наименьшие составные части материи, они представляют собой конец пути – последнюю матрешку – в многочисленных слоях, образующих структуру микромира. С этой точки зрения, даже если струны имеют определенные пространственные размеры, вопрос об их составе лишен какого-либо смысла. Если струны состоят из каких-то более мелких компонентов, они не могут быть фундаментальными. Напротив, из чего бы ни состояли струны, эти элементы немедленно займут место струн в притязании на роль наиболее фундаментальных компонентов мироздания. Используя нашу лингвистическую аналогию, можно сказать, что параграфы состоят из предложений, предложения – из слов, слова – из букв. А из чего состоит буква? С лингвистической точки зрения это конец пути. Буквы есть буквы – они представляют собой фундаментальные строительные блоки письменного языка; они не имеют внутренней структуры. Вопрос об их составе не имеет смысла. Аналогично струна представляет собой просто струну – поскольку нет ничего более фундаментального, нельзя описать струну как нечто, состоящее из каких-то других компонентов.

Это первый ответ. Второй ответ основывается на том простом факте, что сегодня мы не знаем, верна ли теория струн и является ли она окончательной теорией мироздания. Если теория струн неверна – ну что же, мы можем забыть струны и неуместный вопрос об их структуре. Хотя такая возможность существует, исследования, проводившиеся с середины 1980-х гг., показывают, что ее вероятность крайне мала. Однако история определенно научила нас, что каждый раз, когда мы углубляем наше понимание Вселенной, мы находим все меньшие компоненты микромира, составляющие более тонкий уровень организации материи. Итак, еще одна возможность, в случае если теория струн не окажется окончательной теорией, состоит в том, что струны образуют еще один слой в луковице мироздания, слой, который становится видимым в масштабах планковской длины, но который не является последним слоем. В этом случае струны могут состоять из еще более мелких структур. Специалисты по теории струн осознают такую возможность и ведут теоретические исследования в этом направлении. На сегодняшний день эти исследования привели к некоторым интригующим догадкам о более глубоких уровнях структуры, но они еще не получили окончательного подтверждения. Только время и дальнейшие исследования дадут окончательный ответ на этот вопрос.

За исключением некоторых гипотез, рассматриваемых в главах 12 и 15, мы будем рассматривать струны в том смысле, который следует из первого ответа, т. е. будем считать их наиболее фундаментальными компонентами мироздания.

Объединение через теорию струн

Помимо неспособности включить в себя гравитационное взаимодействие, стандартная модель обладает еще одним недостатком – она не дает описания устройства объектов, с которыми работает. Почему природа выбрала именно те частицы и взаимодействия, которые были описаны в предыдущих главах и перечислены в табл. 1.1 и 1.2? Почему 19 параметров, которые описывают количественные характеристики этих компонентов, имеют именно те значения, которые имеют? Ученым не удавалось отделаться от чувства, что количество и свойства этих объектов являются совершенно случайными. Скрывается ли за этими, на первый взгляд абсолютно произвольными компонентами, какой-то более глубокий смысл, или физические свойства мироздания являются просто «игрой случая»?

Стандартная модель сама по себе не способна дать объяснения всем этим фактам, поскольку она принимает список частиц и их свойств как полученные экспериментально входные данные. Как показатели фондового рынка не могут быть использованы для определения ценности портфеля акций, которым вы владеете, без входных данных о ваших начальных капиталовложениях, так и стандартная модель не может быть использована для получения предсказаний без входных данных, содержащих фундаментальные свойства частиц6). После того как экспериментаторы проведут тщательное измерение этих данных, теоретики смогут использовать стандартную модель для поддающихся проверке предсказаний, например, что произойдет, если столкнуть какие-то определенные частицы в ускорителе. Но стандартная модель в той же мере не способна объяснить фундаментальные свойства частиц, перечисленные в табл. 1.1 и 1.2, в какой среднее значение индекса Доу-Джонса не способно ответить на вопрос о начальных капиталовложениях, сделанных десять лет тому назад.

На самом деле, если эксперименты покажут, что в микромире существуют какие-то иные частицы или какие-то дополнительные взаимодействия, то в стандартной модели изменения могут быть легко учтены путем замены списка входных параметров. В этом смысле структура стандартной модели обладает слишком большой гибкостью, чтобы дать объяснение свойствам элементарных частиц: она охватывает целый диапазон различных возможностей.

Теория струн имеет совершенно иной характер. Это теоретическое здание единой и жесткой конструкции. Все входные данные, которые ей необходимы, ограничиваются описываемым ниже единственным параметром, который устанавливает шкалу для проведения измерений. Теория струн способна объяснить все свойства микромира. Чтобы понять это, обратимся сперва к более привычным струнам скрипки. Каждая струна может совершать огромное (на самом деле бесконечное) число различных колебаний, известных под названием резонансных колебаний. Пример таких колебаний показан на рис. 6.1. Это колебания, у которых расстояние между максимумами и минимумами одинаково, и между закрепленными концами струны укладывается в точности целое число максимумов и минимумов.

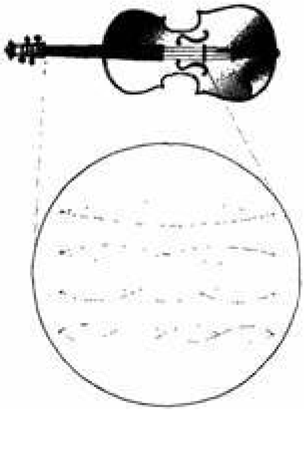

Рис. 6.1. У скрипичных струн существуют резонансные моды колебаний, на которых между концами струны укладывается целое число максимумов и минимумов.

Человеческое ухо воспринимает резонансные колебания как различные музыкальные ноты. Схожие свойства имеют струны в теории струн. Они могут осуществлять резонансные колебания, в которых вдоль длины струн укладывается в точности целое число равномерно распределенных максимумов и минимумов. Некоторые примеры таких колебаний показаны на рис. 6.2.

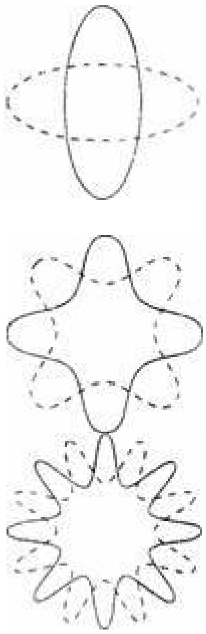

Рис. 6.2. Петли теории струн имеют резонансные моды колебаний, похожие на моды резонансных колебаний скрипичных струн. При этом вдоль длины струны укладывается в точности целое число максимумов и минимумов.

Основное утверждение теории струн таково. Точно так же, как различные моды резонансных колебаний скрипичных струн рождают различные музыкальные ноты, различные моды колебаний фундаментальных струн порождают различные массы и константы взаимодействия. Поскольку это очень важное утверждение, давайте повторим его еще раз. Согласно теории струн свойства элементарных «частиц» – их массы и константы различных взаимодействий – в точности определяются резонансными модами колебаний, реализуемыми внутренними струнами этих частиц.

Легче всего понять эту ассоциацию для массы частицы. Энергия конкретной моды колебания струны зависит от ее амплитуды – максимального расстояния между максимумами и минимумами, и от длины волны – расстояния между двумя соседними пиками. Чем больше амплитуда и чем короче длина волны, тем больше энергия. Это совпадает с нашими интуитивными представлениями – более интенсивные колебания несут больше энергии, менее интенсивные – меньше. Пара примеров показана на рис. 6.3.

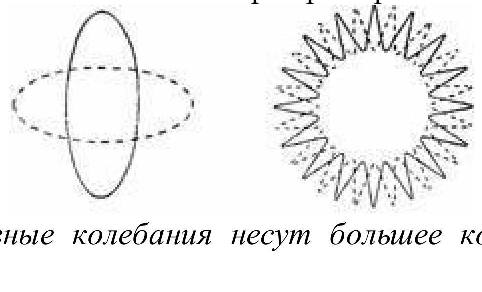

Рис. 6.3. Более интенсивные колебания несут большее количество энергии, менее интенсивные – меньшее.

Такая картина, опять же, привычна для нас: если коснуться струны скрипки сильнее, звук будет более сильным, слабое прикосновение даст более нежный звук. Согласно специальной теории относительности энергия и масса представляют собой две стороны одной медали: чем больше энергия, тем больше масса и наоборот. Таким образом, в соответствии с теорией струн, масса элементарной частицы определяется энергией

колебания внутренней струны этой частицы. Внутренние струны более тяжелых частиц совершают более интенсивные колебания, струны легких частиц колеблются менее интенсивно.

Поскольку масса частицы определяет ее гравитационные характеристики, существует прямая связь между модой колебания струны и откликом частицы на действие гравитационной силы. Используя несколько более абстрактные рассуждения, физики установили, что существует аналогичное соответствие между иными характеристиками колебания струны и реакцией на другие взаимодействия. Например, электрический заряд, константы слабого и сильного взаимодействия, которые несет частица, в точности определяются типом ее колебания. Более того, тот же самый принцип справедлив и для самих частиц, переносящих взаимодействия. Фотоны, калибровочные бозоны слабого взаимодействия и глюоны представляют собой всего лишь иные моды колебаний струн. Что особенно важно, характеристики одной из мод колебаний струн в точности совпадают с характеристиками гравитона, гарантируя, что гравитация является неотъемлемой частью теории струн7).

Таким образом, согласно теории струн наблюдаемые характеристики всех элементарных частиц определяются конкретной модой резонансного колебания внутренних струн. Этот взгляд радикально отличается от точки зрения, которой придерживались физики до открытия теории струн, когда считалось, что различия между фундаментальными частицами обусловлены тем, что они «отрезаны от разных кусков ткани». Хотя частицы считались элементарными, предполагалось, что они состоят из различного «материала». Так, например, «материал» электрона имел отрицательный электрический заряд, а «материал» нейтрино был электрически нейтральными. Теория струн радикально изменила эту картину, объявив, что «материал» всего вещества и всех взаимодействий является одним и тем же. Каждая элементарная частица состоит из отдельной струны, – точнее, каждая частица представляет собой отдельную струну – и все струны являются абсолютно идентичными. Различия между частицами обусловлены различными модами резонансных колебаний этих струн. То, что представлялось различными частицами, на самом деле является различными «нотами», исполняемыми на фундаментальной струне. Вселенная, состоящая из бесчисленного количества этих колеблющихся струн, подобна космической симфонии.

Этот краткий обзор показал, каким образом теория струн дает поистине поразительную объединяющую систему. Каждая частица вещества и каждая частица, переносящая взаимодействие, состоит из струны, мода колебания которой дает «дактилоскопический отпечаток» этой частицы. Поскольку каждое физическое событие, процесс или явление на своем наиболее элементарном уровне может быть описано на языке взаимодействия между этими элементарными компонентами материи, теория струн обещает предоставить в наше распоряжение единое, всеобъемлющее, унифицированное описание физического мира – универсальную теорию мироздания.

Музыка теории струн

Хотя теория струн покончила с предшествующей концепцией элементарных частиц, лишенных внутренней структуры, расставание со старым языком происходит тяжело, особенно когда он дает точное описание действительности вплоть до наименьших доступных масштабов расстояний. Поэтому, следуя сложившимся традициям, мы будем продолжать говорить об «элементарных частицах», но при этом всегда будем помнить, что в действительности это «то, что выглядит элементарной частицей, но на самом деле представляет собой крошечную колеблющуюся струну». В предшествующем разделе мы предположили, что массы и константы взаимодействия таких элементарных частиц связаны с модами колебаний соответствующих струн. Это приводит нас к следующему выводу: если бы мы смогли точно определить все допустимые резонансные моды колебаний фундаментальных струн, – так сказать, «ноты», которые они могут исполнять, мы смогли бы

объяснить наблюдаемые свойства элементарных частиц. Таким образом, теория струн впервые предлагает систему, позволяющую объяснить свойства существующих в природе элементарных частиц.

На данной стадии нужно «взять» струну и «притронуться» к ней всеми возможными способами, чтобы определить возможные моды резонансных колебаний. Если теория струн права, возможные резонансные моды точно воспроизведут наблюдаемые свойства перечисленных в табл. 1.1 и 1.2 частиц вещества и частиц, передающих взаимодействия. Конечно, струны слишком малы, чтобы можно было осуществить такой эксперимент в буквальном смысле слова. Вместо этого мы будем «притрагиваться» к струнам теоретически, используя математические модели. В середине 1980-х гг. многие приверженцы теории струн верили, что соответствующие математические методы способны объяснить все тончайшие детали строения мироздания на самом микроскопическом уровне. Некоторые энтузиасты провозгласили, что, наконец-то, найдена теория всего. Оглядываясь на прошедшее десятилетие, мы видим, что эйфория, порожденная этой верой, была преждевременна. Теория струн имеет задатки стать «теорией всего», но на ее пути остается еще ряд препятствий, не позволяющих определить спектр колебаний струн с точностью, достаточной для сравнения с экспериментальными данными. Поэтому в настоящее время мы не знаем, может ли теория струн объяснить фундаментальные характеристики мироздания, приведенные в табл. 1.1 и 1.2. Как будет показано в главе 9, при определенных обстоятельствах, которые будут четко сформулированы, теория струн приводит к Вселенной, свойства которой находятся в качественном согласии с данными для известных частиц и взаимодействий. Но предоставить детальные количественные характеристики эта теория сегодня еше не в состоянии. Таким образом, хотя в отличие от стандартной модели с ее точечными частицами теория струн способна дать объяснение, почему частицы и взаимодействия имеют те свойства, которые они имеют, мы пока не способны их «выудить». Однако удивительно то, насколько богата теория струн и сколь далеко она простирается. Хотя мы пока не можем детально определить ее свойства, она позволяет проникнуть в суть целого ряда новых вытекающих из нее физических явлений. Мы увидим это ниже.

В следующих главах мы более подробно обсудим имеющиеся проблемы, однако полезно сначала ознакомиться с ними в самых общих чертах. Окружающие нас струны могут иметь самое разное натяжение. Например, шнурки на ботинках обычно натянуты намного слабее, чем струны на скрипке. И те и другие, в свою очередь, имеют гораздо меньшее натяжение, чем струны рояля. Единственным параметром, который требуется для калибровки теории струн, является их натяжение. Как определить это натяжение? Если бы мы могли коснуться фундаментальной струны, мы узнали бы ее жесткость и могли бы определить ее натяжение тем же способом, который используется для других, более привычных струн. Но поскольку фундаментальные струны так малы, мы не можем использовать этот подход, и возникает необходимость в разработке косвенного метода. В 1974 г., когда Шерк и Шварц предположили, что одна из мод колебания струн представляет собой гравитон, они смогли использовать такой косвенный метод и определить натяжение, с которыми оперирует теория струн. Их расчеты показали, что интенсивность взаимодействия, передаваемого колебанием струны, соответствующем гравитону, обратно пропорциональна натяжению струны. А поскольку гравитон передает гравитационное взаимодействие, которое является очень слабым, полученное ими значение натяжения оказалось колоссальным: тысяча миллиардов миллиардов миллиардов миллиардов (1039) тонн, так называемое планковское натяжение. Таким образом, фундаментальные струны являются чрезвычайно жесткими по сравнению с обычными. Этот результат имеет три важных следствия.

Три следствия жестких струн

Во-первых, в то время, как струны рояля закреплены, что гарантирует постоянство их длины, для фундаментальных струн подобного закрепления, ограничивающего их размер,

нет. Вместо этого чудовищное натяжение струн заставляет петли, которые рассматриваются в теории струн, сжиматься до микроскопических размеров. Детальные расчеты показывают, что под действием планковского натяжения типичная струна сжимается до планковской длины, т.е. до 10-33 см, как отмечалось выше8).

Во-вторых, вследствие такого огромного натяжения типичная энергия колеблющейся петли в теории струн становится чрезвычайно большой. Чтобы понять это, вспомним, что чем больше натяжение струны, тем труднее заставить ее колебаться. Например, заставить колебаться струну скрипки гораздо легче, чем струну рояля. Поэтому две струны, колеблющиеся совершенно одинаковым образом, но натянутые по-разному, будут иметь различную энергию. Струна с большим натяжением будет иметь большую энергию, чем струна с низким натяжением, поскольку для того, чтобы привести ее в движение, потребуется большее количество энергии.

Это говорит о том, что энергия колеблющейся струны зависит от двух вещей: от точного вида колебаний (более интенсивные колебания соответствуют более высокой энергии) и от натяжения струны (более сильное натяжение, опять же, соответствует более высокой энергии). На первый взгляд это описание может привести вас к мысли, что при переходе к более слабым колебаниям, с меньшей амплитудой и с меньшим числом максимумов и минимумов, струна будет обладать все меньшей энергией. Однако, как будет показано в главе 4 (в другом контексте), квантовая механика утверждает, что это рассуждение неверно. Согласно квантовой механике колебания струн, подобно всем другим колебаниям и волноподобным возмущениям, могут иметь только дискретные значения энергии. Грубо говоря, подобно компаньонам из ангара, у которых доверенные им деньги равны произведению целого числа на номинал денежных купюр, энергия, которую несет та или иная мода колебания струны, представляет собой произведение целого числа на минимальный энергетический номинал. Конкретней, этот минимальный энергетический номинал пропорционален натяжению струны (а также числу максимумов и минимумов конкретной моды колебаний), а целочисленный множитель определяется амплитудой моды колебаний.

Ключевым моментом здесь является следующее. Поскольку минимальный энергетический номинал пропорционален огромному натяжению струны, минимальная фундаментальная энергия также будет огромна по сравнению с обычными масштабами физики элементарных частиц. Она будет кратна величине, известной под названием планковская энергия. Чтобы дать представление об этой величине, скажем, что если мы пересчитаем планковскую энергию в массу, используя знаменитую формулу Эйнштейна Е = тс2, полученное значение будет примерно в десять миллиардов миллиардов (1019) раз превышать массу протона. Эта чудовищная по стандартам физики элементарных частиц масса известна под названием планковской массы; она примерно равна массе пылинки или массе колонии из миллиона средних по размерам бактерий. Итак, типичная эквивалентная масса колеблющейся петли в теории струн обычно равна произведению целого числа (1, 2, 3, и т.д.) на планковскую массу. Физики говорят, что в теории струн «естественной» или «характерной» шкалой энергий (или масс) является планковская шкала.

Здесь возникает важный вопрос, имеющий прямое отношение к задаче воспроизведения характеристик частиц в табл. 1.1 и 1.2. Если «естественная» энергетическая шкала теории струн примерно в десять миллиардов миллиардов раз превышает значения энергии и массы протона, как она может использоваться для намного более легких частиц – электронов, кварков, протонов и т. п., – образующих окружающий нас мир?

Ответ снова приходит из квантовой механики. Соотношение неопределенностей гарантирует, что не существует состояния абсолютного покоя. Все объекты испытывают квантовые флуктуации, поскольку в противном случае мы могли бы, в нарушение соотношения Гейзенберга, с абсолютной точностью узнать их местоположение и скорость. Это справедливо и для петель теории струн: независимо от того, насколько спокойной выглядит струна, она всегда в той или иной мере испытывает действие квантовых

осцилляции. Замечательный факт, впервые установленный в 1970-х гг., состоит в том, что квантовые осцилляции и обычные колебания струны, которые обсуждались выше и были показаны на рис. 6.2 и 6.3, с энергетической точки зрения взаимно сокращают друг друга. Действительно, согласно квантовой механике энергия квантовых флуктуации струны является отрицательной и уменьшает общую энергию колеблющейся струны на величину, примерно равную планковской энергии. Это означает, что струнные колебания с наинизшей энергией (которая, как мы наивно полагали, должна была равняться планковской энергии) в большинстве своем сокращаются, и в результате остаются колебания с относительной низкой суммарной энергией, массовый эквивалент которой близок к массам перечисленных в табл. 1.1 и 1.2 частиц вещества и частиц, переносящих взаимодействия. Следовательно, именно моды колебаний с наименьшей энергией обеспечивают контакт между теоретическим описанием струн и экспериментом в мире физики элементарных частиц. Например, Шерк и Шварц обнаружили, что мода колебаний, являющаяся кандидатом на роль гравитона, характеризуется полным сокращением энергии частицы, являющейся переносчиком гравитационного взаимодействия, приводя к нулевой массе. Это именно то, что ожидалось для гравитона: сила тяготения распространяется со скоростью света, и только частицы, не имеющие массы, могут двигаться с этой максимальной скоростью. Однако низкоэнергетические моды колебаний в гораздо большей степени являются исключением, чем правилом. Более типичное колебание фундаментальной струны соответствует частице, масса которой в миллиарды миллиардов раз превосходит массу протона.

Из этого следует, что сравнительно легкие фундаментальные частицы табл. 1.1 и 1.2 образуются, в некотором смысле, из тумана, расстилающегося над ревущим океаном высокоэнергетических струн. Даже такая тяжелая частица, как t-кварк, масса которой примерно в 189 раз превосходит массу протона, может возникнуть в результате колебания струны только в том случае, если гигантская собственная энергия струны, равная по порядку планковской энергии, будет сокращена квантовыми флуктуациями с точностью, превышающей один на сто миллионов миллиардов. Выходит так, как если бы вы были участником телеигры Верная цена (Старейшая игра на американском телевидении, напоминающая «Поле Чудес» с Леонидом Якубовичем. Боб Баркер более 30 лет является бессменным ведущим этой игры. – Прим. перев.) и Боб Баркер дал бы вам десять миллиардов миллиардов долларов и потребовал, чтобы вы купили продукты («сократили» деньги) на всю сумму, оставив только 189 долларов, ни долларом больше или меньше. Потратить такую огромную сумму, да еще с такой точностью, не зная при этом точных цен покупаемых товаров, – эта задача была бы очень тяжела даже для самых ловких из самых квалифицированных покупателей в мире. В теории струн, где средством обращения является энергия, а не деньги, приближенные вычисления с определенностью показали, что подобное сокращение энергии может происходить; однако по причинам, которые будут становиться все более ясными в последующих главах, подтверждение сокращения со столь высоким уровнем точности обычно лежит за пределами возможности современной теоретической физики. Несмотря на это, как было отмечено выше, мы увидим, что многие другие явления теории струн, которые менее чувствительны к таким тонким деталям, могут быть установлены и объяснены с достаточной достоверностью.

Это ведет нас к третьему следствию, имеющему огромное значение в теории струн. Существует бесконечное число мод колебаний струны. Для примера на рис. 6.2 мы показали начало бесконечной последовательности вариантов, характеризующих вероятности колебаний с увеличивающимся числом максимумов и минимумов. Не означает ли это существование бесконечной последовательности элементарных частиц, что находилось бы в явном противоречии с современной ситуацией в экспериментальных исследованиях, показанной на табл. 1.1 и 1.2?

Ответом является «да». Если теория струн верна, каждой из бесконечного множества резонансных мод колебаний струн должна соответствовать элементарная частица. Здесь, однако, есть один важный момент. Высокое натяжение струн гарантирует, что за редким

исключением эти моды колебаний соответствуют чрезвычайно тяжелым частицам (исключение составляют колебания с минимальной энергией, которые отличаются почти полным сокращением массы ввиду квантовых флуктуации). Слово «тяжелый» здесь опять же означает «во много раз тяжелее планковской массы». Поскольку самые мощные из существующих ускорителей способны достичь энергий порядка тысячи масс протона, что составляет менее одной миллионной от одной миллиардной планковской энергии, возможность лабораторного изучения этих новых частиц, предсказываемых теорией струн, появится еще нескоро.

Существуют, однако, другие, менее прямые способы поиска таких частиц. Например, энергии при возникновении Вселенной были достаточно высокими, чтобы такие частицы появлялись в изобилии. Вообще говоря, вряд ли можно ожидать, что эти частицы дожили до наших дней, поскольку сверхтяжелые частицы обычно нестабильны и высвобождают свои огромные массы путем последовательного распада на все более легкие частицы, превращаясь, в конце концов, в обычные, относительно легкие частицы окружающего нас мира. Однако существует вероятность того, что такое сверхтяжелое состояние колебаний струны, являющееся реликтом эпохи Большого взрыва, могло дожить до наших дней. Открытие таких частиц, которое будет обсуждаться подробнее в главе 9, стало бы эпохальным событием.

Гравитация и квантовая механика в теории струн

Единая схема, которую дает теория струн, очень привлекательна. Но истинную неотразимость придает ей возможность избавиться от вражды между гравитационным взаимодействием и квантовой механикой. Вспомним, что проблема при объединении общей теории относительности и квантовой механики возникает, когда основное понятие первой из них – плавно искривленная геометрическая структура пространства и времени – сталкивается с главной особенностью второй, что все во Вселенной, включая структуру пространства и времени, испытывает квантовые флуктуации, интенсивность которых растет при уменьшении масштаба исследований. На субпланковском масштабе расстояний квантовые флуктуации становятся столь сильными, что приводят к разрушению понятия гладкого искривленного геометрического пространства, и это означает нарушение принципов общей теории относительности.

Теория струн смягчает неистовые квантовые флуктуации путем «размазывания» микроскопических характеристик пространства. На вопрос о том, что это значит в действительности и как это разрешает противоречие, есть два ответа: грубый и более точный. Мы поочередно рассмотрим каждый из них.

Грубый ответ

Хотя это звучит довольно наивно, один из способов, которым мы можем изучить структуру какого-либо объекта, состоит в том, чтобы бросать в него другие предметы и наблюдать за тем, как они отражаются от него. В качестве примера укажем, что мы способны видеть предметы потому, что наши глаза собирают, а наш мозг расшифровывает информацию, которую несут фотоны, отражающиеся от объектов, на которые мы смотрим. На этом же принципе основаны ускорители частиц: в них частицы материи, например, электроны и протоны, сталкиваются между собой и с другими объектами; затем специальные детекторы анализируют разлетающиеся осколки для получения информации, позволяющей определить структуру объектов, участвующих в столкновениях.

Общее правило при таких исследованиях состоит в том, что размер частиц, используемых для исследования, определяет нижний предел разрешающей способности измерительной установки. Чтобы лучше понять смысл этого важного утверждения, представим, что Слим и Джим решили приобщиться к культуре и записались в кружок по

рисованию. По ходу занятий Джима начинают все более раздражать растущие художественные способности Слима, и он вызывает его на необычное состязание. Он предлагает, чтобы каждый взял косточку от персика, закрепил ее в тисках и изобразил наиболее точным образом. Необычность предложения Джима состоит в том, что ни ему, ни Слиму не разрешается смотреть на косточку. Вместо этого каждый из них может бросать в нее разные предметы (но не фотоны!), наблюдать за тем, как они отскакивают от косточки, и на этой основе определять размеры, форму и детали строения косточки (см. рис. 6.4). Тайком от Слима Джим заряжает его «стрелялку» крупными шариками (как на рис. 6.4а), а свою – пятимиллиметровыми пластиковыми пульками гораздо меньшего размера (как на рис. 6.4 б). Оба заводят свои орудия, и состязание начинается.

Лучшее, что удалось изобразить Слиму, показано на рис. 6.4 а. Наблюдая за траекторией отскакивающих шариков, он смог установить, что размер косточки мал, и что она имеет твердую поверхность. Но это все, что ему удалось узнать. Шарики были слишком велики, чтобы на них оказывали влияние более мелкие детали строения персиковой косточки. Когда Слим бросил взгляд на рисунок Джима (рис. 6.4б), он был поражен тем, что увидел. Однако быстрый взгляд на стрелялку Джима позволил ему понять, в чем дело: небольшие пульки, используемые Джимом, были достаточно малы, чтобы на угол, под которым они отражались, оказывали влияние некоторые крупные детали строения косточки. Таким образом, выстрелив в косточку большим количеством пятимиллиметровых пулек и наблюдая за их траекториями после отскока, Джим смог нарисовать более подробный рисунок. Чтобы не проиграть, Слим взял свою стрелялку, заполнил ее снарядами еще меньшего размера – полумиллиметровыми пульками, – которые так малы, что на характер их отражения будут оказывать влияние мельчайшие морщинки на поверхности косточки. Наблюдая за отскоком этих пулек, он смог нарисовать рисунок, который принес ему победу (рис. 6.4 в).

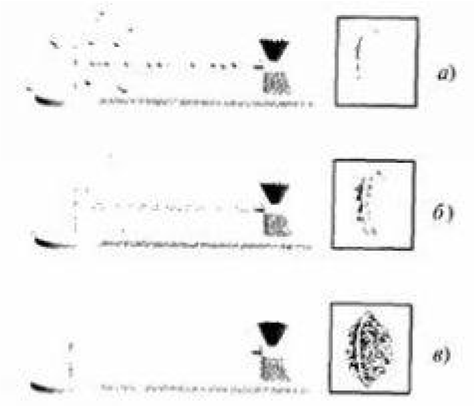

Рис. 6.4. Персиковая косточка закреплена в тисках. Для создания ее изображения используются только наблюдения за тем, как отскакивают предметы – «зонды», – брошенные в нее. Используя зонды все меньшего размера – шарики (а), пятимиллиметровые пульки (б), полумиллиметровые пульки (в), можно получать все более детальное изображение.

Урок, который можно извлечь из этого маленького состязания, ясен: размер частиц-зондов не может существенно превышать размер изучаемых физических особенностей; в противном случае разрешающая способность исследования окажется недостаточной для изучения интересующих нас структур.

Те же самые выводы относятся, конечно, и к случаю, когда мы захотим провести более глубокое исследование персиковой косточки, чтобы определить ее структуру на атомном и субатомном уровне. Полумиллиметровые пульки не дадут никакой полезной информации по этому вопросу; они явно слишком велики, чтобы исследовать структуру на атомном уровне. Именно по этой причине в ускорителях в качестве зондов используются протоны или электроны: маленький размер этих частиц делает их гораздо более подходящими для этой цели. На субатомном уровне, где на смену классической логике приходят квантовые

понятия, наиболее подходящей мерой разрешающей способности частиц является квантовая длина волны, которая определяет диапазон неопределенности местонахождения частиц. Этот факт является следствием приведенного в главе 4 обсуждения соотношения неопределенностей Гейзенберга. Там мы установили, что минимальная погрешность при использовании в качестве зонда точечных частиц (мы говорили о фотонных зондах, но сказанное применимо и ко всем другим частицам) примерно равна квантовой длине волны частицы, используемой в качестве зонда. Грубо говоря, разрешающая способность точечной частицы размазывается в результате действия квантовых флуктуации подобно тому, как точность скальпеля хирурга уменьшается, когда его руки дрожат. Вспомним, однако, что в главе 4 мы также отметили один важный факт, состоящий в том, что квантовая длина волны частицы обратно пропорциональна моменту количества движения, который, грубо говоря, определяется ее энергией. Таким образом, увеличивая энергию точечной частицы, можно делать ее квантовую длину волны все меньше и меньше, квантовое размазывание будет все более уменьшаться и, следовательно, мы сможем использовать эту частицу для изучения все более тонких структур. Интуитивно понятно, что частицы высокой энергии имеют большую проникающую способность и могут использоваться для изучения более мелких деталей строения.

В этом смысле становится очевидным различие между точечными частицами и нитями струн. Как в примере с пластиковыми пульками для изучения структуры поверхности персиковой косточки, присущая струне пространственная протяженность не позволяет использовать ее для исследования объектов, размер которых существенно меньше размера струны, в нашем случае – объектов, характерные размеры которых меньше планковской длины. Если перейти к более точным формулировкам, в 1988 г. Дэвид Гросс, работавший в то время в Принстонском университете, и его студент Пол Менде показали, что если учитывать квантовую механику, то непрерывное увеличение энергии струны не приводит к непрерывному увеличению ее способности исследовать все более тонкие структуры, в отличие от того, что имело бы место для точечной частицы. Они установили, что при увеличении энергии струны сначала ее разрешающая способность растет так же, как у точечной частицы высокой энергии. Однако, когда энергия струны превышает значение, необходимое для изучения структур в масштабе планковской длины, дополнительная энергия перестает вызывать увеличение разрешающей способности. Вместо этого дополнительная энергия приводит к увеличению размера струны, тем самым уменьшая ее разрешающую способность. Типичный размер струны близок к планковской длине, но если накачать струну достаточной энергией, которую мы не можем даже представить, но которая могла существовать во время Большого взрыва, то можно было бы заставить струну вырасти до макроскопических размеров. Это был бы довольно топорный инструмент для изучения микромира! Все выглядит так, как будто струна, в отличие от точечной частицы, имеет два источника размазывания: квантовые флуктуации, как для точечной частицы, а также собственные пространственные размеры. Увеличение энергии струны уменьшает размазывание, связанное с первым источником, но, в конечном счете, увеличивает размазывание, обусловленное вторым. В результате, как бы вы ни старались, физические размеры струны не позволят вам использовать ее на субпланковском масштабе расстояний.

Но ведь конфликт между обшей теорией относительности и квантовой механикой возникает благодаря свойствам структуры пространства, проявляющимся в субпланковском масштабе расстояний. Если элементарные компоненты Вселенной непригодны для исследований на субпланковских масштабах расстояний, это значит, что ни они, ни какие-либо объекты, состоящие из таких компонентов, не могут испытывать влияния этих кажущихся гибельных квантовых флуктуации на малых масштабах. Это похоже на то, что произойдет, если мы проведем рукой по полированной гранитной поверхности. Хотя на микроскопическом уровне гранит является дискретным, зернистым и неровным, наши пальцы не смогут обнаружить эти микроскопические неровности, и поверхность покажется нам абсолютно гладкой. Наши толстые, длинные пальцы «смажут» микроскопическую

дискретность. Подобно этому, поскольку струна имеет конечные пространственные размеры, существует нижний предел ее разрешающей способности. Струна не способна обнаружить изменения на суб-планковском масштабе расстояний. Подобно нашим пальцам на граните, струна смажет ультрамикроскопические флуктуации гравитационного поля. И хотя результирующие флуктуации по-прежнему остаются значительными, это смазывание сгладит их в степени, достаточной для преодоления несовместимости общей теории относительности и квантовой механики. В частности, теория струн ликвидирует обсуждавшиеся в предыдущей главе фатальные бесконечности, возникающие при попытке построить квантовую теорию гравитации на основе модели точечных частиц.

Существенное различие между аналогией с гранитом и нашей реальной проблемой структуры пространства состоит в том, что существуют способы обнаружить микроскопическую дискретность поверхности гранита. Для этого могут использоваться более точные зонды, чем наши пальцы. Электронный микроскоп способен обнаружить поверхностные структуры, размер которых составляет менее одной миллионной доли сантиметра; этого достаточно, чтобы увидеть многочисленные неровности на поверхности. В противоположность этому, в теории струн нет способа обнаружить «неровности» в структуре пространства на субпланковском уровне. Во Вселенной, управляемой законами теории струн, уже не является истинной обычная точка зрения, согласно которой мы можем без ограничения делить объекты на все более и более мелкие части. Предел существует, он вступает в игру, когда мы сталкиваемся с разрушительной квантовой пеной, показанной на рис. 5.1. Следовательно, в определенном смысле, который станет яснее в последующих главах, можно утверждать, что бурные квантовые флуктуации на субпланковских расстояниях не существуют. Как выразился бы позитивист, объект или явление существует, только если мы можем – хотя бы в принципе – исследовать и измерить его. Поскольку предполагается, что струны являются наиболее фундаментальным объектом мироздания и имеют слишком большой размер, чтобы на них оказывали влияние флуктуации структуры пространства, происходящие на субпланковских расстояниях, эти флуктуации не могут быть измерены, и, следовательно, согласно теории струн они не существуют.

Ловкость рук?

Обсуждение, приведенное выше, может оставить у вас чувство неудовлетворенности. Вместо того чтобы показать, что теория струн укрощает субпланковские флуктуации структуры пространства, мы, похоже, использовали ненулевой размер струн для того, чтобы обойти всю проблему стороной. Решили ли мы вообще хоть что-нибудь? Решили. Следующие два соображения позволят нам лучше понять это.

Прежде всего вывод, который можно сделать из предыдущего обсуждения, состоит в том, что предполагаемые флуктуации структуры пространства в масштабе субпланковских расстояний связаны исключительно с формулировкой общей теории относительности и квантовой механики в рамках модели, основанной на точечных частицах. Это означает, что центральное противоречие современной теоретической физики в определенном смысле является проблемой, которую породили мы сами. Поскольку мы ранее предположили, что все частицы вещества и все частицы, передающие взаимодействие, должны быть точечными объектами, практически не имеющими пространственной протяженности, мы были обязаны рассматривать свойства Вселенной на произвольно малых масштабах. И на самых малых расстояниях мы столкнулись с проблемой, выглядящей неразрешимой. Теория струн утверждает, что мы столкнулись с этой проблемой только потому, что не поняли истинных правил игры: новые правила гласят, что существует предел тому, насколько глубоко можно исследовать Вселенную, – предел, определяющий, до какого уровня наше обычное понятие расстояния может применяться к ультрамикроскопической структуре мироздания. Становится понятно, что фатальные флуктуации структуры пространства возникают в наших теориях из-за неосведомленности об этих пределах: модель с точечными частицами далеко

выходит за рамки физической реальности.

Видя кажущуюся простоту этого решения, позволяющего разрешить конфликт, возникающий между общей теорией относительности и квантовой механикой, вы можете удивиться, почему прошло столько времени, пока ученые не осознали, что точечная модель частиц всего лишь идеализация, и что в реальном мире элементарные частицы имеют некоторые конечные размеры. Это второй момент, на который мы хотели бы обратить внимание. Уже давно некоторые из величайших умов теоретической физики, такие как Паули, Гейзенберг, Дирак и Фейнман, предполагали, что компоненты природы в действительности могут быть не точками, а маленькими, колеблющимися «капельками» или «ядрышками». Однако они, как и другие ученые, столкнулись с тем, что очень трудно построить теорию, фундаментальные компоненты которой не являются точечными частицами, и которая, в то же время, совместима с основополагающими физическими принципами, такими, как сохранение квантово-механической вероятности (согласно которому физические объекты не могут внезапно исчезать из Вселенной без всякого следа) и невозможность передачи информации со скоростью, превышающей скорость света. Снова и снова их исследования с разных точек зрения показывали, что отказ от парадигмы точечных частиц приводит к несоблюдению одного из этих принципов или их обоих. Поэтому в течение долгого времени казалось невозможным построить разумную квантовую теорию, основанную на чем либо ином, кроме точечных частиц. За двадцать с лишним лет глубоких исследований выяснилась поистине впечатляющая особенность теории струн: при всей непривычности некоторых понятий теория струн обладает всеми свойствами, которые должна иметь каждая разумная физическая теория. И, более того, благодаря наличию мод колебаний, реализующих гравитон, теория струн представляет собой квантовую теорию, включающую гравитацию.

Более точный ответ

Грубый ответ ухватывает сущность того, почему теория струн смогла добиться успеха там, где предшествующие теории, основанные на точечной модели частиц, потерпели неудачу. Поэтому без ущерба для понимания дальнейшего можно сразу перейти к следующему разделу. Однако, рассмотрев в главе 2 основные идеи специальной теории относительности, мы получили в свое распоряжение средства, позволяющие более точно описать, как теория струн борется с разрушительными квантовыми флуктуаииями.

В более точном ответе мы будем использовать те же основные идеи, которые содержались в приближенном ответе, но выразим их непосредственно на языке струн. Мы увидим, как конечность размера струн «размазывает» информацию, которую можно было бы получить при зондировании с использованием точечных частиц, и тем самым, к нашему счастью, снимает проблему поведения пространства на ультрамикроскопических расстояниях, ответственную за центральную дилемму современной физики.

Сначала рассмотрим, как происходило бы взаимодействие между точечными частицами, если бы они действительно существовали, и, соответственно, как можно было бы использовать их в качестве физических зондов. Наиболее важным является показанный на рис. 6.5 случай взаимодействия между частицами, движущимися по пересекающимся путям, приводящим к столкновению. Если бы эти частицы были бильярдными шарами, они могли бы столкнуться, после чего каждая из них начала бы двигаться по новой траектории. Квантовая теория поля с точечными частицами показывает, что то же самое происходит при столкновении элементарных частиц – они отскакивают друг от друга и продолжают свой путь по новым траекториям. – однако детали этого процесса отличаются.

Рис. 6.5. Две частицы взаимодействуют: они «сталкиваются между собой», и это

приводит к изменению траектории каждой из них.

Для большей определенности и простоты представим себе, что одна из двух частиц является электроном, а другая – ее античастицей, позитроном. При столкновении частицы и античастицы они аннигилируют с выделением энергии в чистом виде, приводящим к образованию, например, фотона9). Чтобы отличать выходящую траекторию фотона от входящих траекторий электрона и позитрона, мы будем, следуя принятому в физике соглашению, изображать ее волнистой линией. Обычно фотон проходит небольшое расстояние, после чего высвобождает энергию, полученную от первоначальной электрон-позитронной пары, путем образования другой электрон-позитронной пары, показанной в правой части рис. 6.6.

Рис. 6.6. В квантовой теории поля частица и ее античастица могут мгновенно аннигилировать с образованием фотона. Затем этот фотон порождает другую частицу и античастицу, которые движутся по расходящимся траекториям.

Эти две частицы испытывают электромагнитное взаимодействие и, в конце концов, разлетаются по расходящимся траекториям. Такая последовательность событий имеет определенное сходство с описанием бильярдных шаров.

Нас интересуют детали взаимодействия, в частности, точка, где начальные электрон и протон аннигилируют с образованием фотона. Как станет ясно далее, главным является тот факт, что время и место этого события могут быть установлены однозначно и точно, как показано на рис. 6.6.

Как изменится описание, приведенное выше, если после тщательного исследования объектов, которые мы считали нульмерными точками, они окажутся одномерными струнами? Основной процесс взаимодействия будет тем же самым, но теперь движущиеся по пути к столкновению объекты представляют собой осциллирующие петли, показанные на рис. 6.7. Для определенных колебаний струны ее моды будут как раз соответствовать протону и электрону, движущихся курсом на столкновение, как показано на рис. 6.6. Истинный струнный характер становится очевидным только при исследовании в ультрамикроскопическом масштабе, выходящем далеко за пределы современных экспериментальных возможностей. Как и в случае с точечными частицами, две струны сталкиваются и аннигилируют, превращаясь во вспышку, которая представляет собой фотон и сама по себе является струной, колеблющейся в определенной моде. Таким образом, две исходные струны взаимодействуют между собой, сливаясь и образуя третью струну, как показано на рис. 6.7. Как и в случае точечных частиц, эта струна проходит некоторое расстояние, после чего выделяет энергию, полученную от двух исходных струн, разделяясь на две новые струны, которые продолжают движение. Опять же, со всех точек зрения, кроме той, которая относится к микроскопическим масштабам, это будет выглядеть идентично взаимодействию между точечными частицами на рис. 6.6.

Существует, однако, радикальное различие между этими двумя описаниями. Мы подчеркнули, что взаимодействие между точечными частицами происходит в однозначно идентифицируемой точке пространства и времени, в точке, с положением которой согласятся все наблюдатели. Как мы сейчас увидим, для взаимодействия между струнами это неверно. Мы продемонстрируем это, сравнив, как Джордж и Грейс, два наблюдателя, находящихся в относительном движении, могли бы описать это взаимодействие. Мы увидим, что они не придут к единому мнению по вопросу о том, где и когда две струны впервые пришли в соприкосновение.

Представим, что мы наблюдаем за взаимодействием двух струн с помощью фотокамеры, затвор которой остается открытым, и вся хронология процесса регистрируется на одном фрагменте пленки 10). На рис. 6.7 в показан результат: его называют мировой поверхностью. Путем «разрезания» мировой поверхности на параллельные части (примерно

так же, как мы разрезаем на куски батон хлеба) можно восстановить, момент за моментом, историю взаимодействия струн.

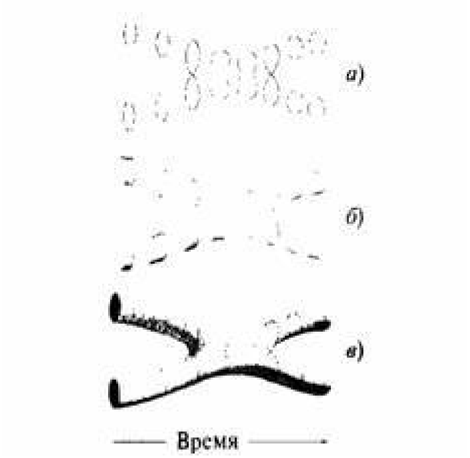

Рис. 6.7. а) Две струны, движущиеся курсом на столкновение, могут слиться и образовать третью струну, которая вслед за этим может разделиться на две струны, движущиеся по расходящимся траекториям. 6) Тот же процесс, что и на рис. а), но более явно прослеживающий движение струн, в) «Замедленная киносъемка» двух взаимодействующих струн дает мировую поверхность.

Пример такого разрезания показан на рис. 6.8. В частности, на рис. 6.8 а мы показали Джорджа, пристально наблюдающего за двумя сближающимися частицами, а также плоскость, которая вычленяет все события в пространстве, происходящие одновременно с его точки зрения.

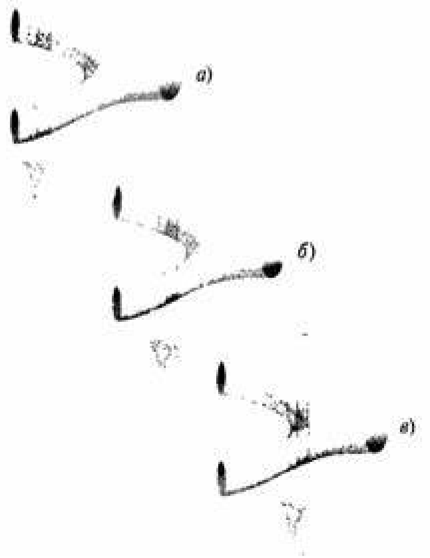

Рис. 6.8. Две исходные струны (с точки зрения Джорджа) в три последовательных момента времени. В моменты а) и б) струны сближаются, в момент в), с его точки зрения, они впервые соприкоснулись.

Как часто делалось в предыдущих главах, для наглядности мы отбросили на диаграмме одно пространственное измерение. На самом деле, конечно, существует трехмерный массив событий, которые происходили одновременно для любого наблюдателя.

На рис. 6.8 б и 6.8 в приведены два последовательных моментальных снимка – два последовательных «среза» мировой поверхности, – показывающих, как Джордж видит две струны, приближающиеся друг к другу. Особую важность имеет отмеченный на рис. 6.8 в момент, когда, с точки зрения Джорджа, две струны войдут в соприкосновение и сольются, образовав третью струну.

А теперь повторим все то же самое для Грейс. Как мы указывали в главе 2, относительное движение Джорджа и Грейс приведет к тому, что они не согласятся по вопросу о том, какие события являются одновременными. С точки зрения Грейс события в

пространстве, являющиеся одновременными, лежат в другой плоскости, показанной на рис. 6.9. Иными словами, по мнению Грейс, для того чтобы момент за моментом восстановить процесс взаимодействия, мировая поверхность на рис. 6.7 в должна быть «нарезана» на куски под другим углом.

На рис. 6.9 б и 6.9 в мы снова показали последовательные моменты времени, но теперь уже с точки зрения Грейс, включая момент, когда две начальные струны по ее наблюдениям войдут в соприкосновение и образуют третью струну.

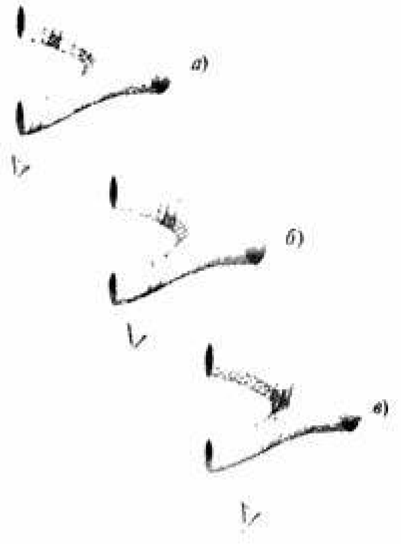

Рис. 6.9. Две исходные струны (с точки зрения Грейс) в три последовательных момента времени. В моменты о) и б) струны сближаются, в момент в), с ее точки зрения, они впервые соприкоснулись.

Сравнивая рис. 6.8 в и 6.9 в (результат показан на рис. 6.10), мы видим, что мнения Джорджа и Грейс разделятся относительно того, где и когда две исходные струны впервые соприкоснулись, т. е. где они взаимодействовали.

Рис. 6.10. Мнения Джорджа и Грейс по вопросу о месте, в котором произошло взаимодействие, разойдутся.

Поскольку струна является протяженным объектом, это означает, что не существует однозначного места в пространстве или момента во времени, когда струны начали взаимодействовать – эти характеристики зависят от того, как движется наблюдатель.

Если применить те же самые рассуждения к взаимодействию точечных частиц, как показано на рис. 6.11, мы вновь придем к выводам, которые уже получили ранее: существуют определенная точка в пространстве и момент во времени, когда произошло взаимодействие частиц.

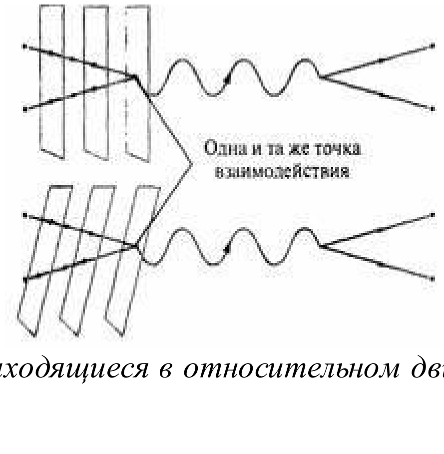

Рис. 6.11. Наблюдатели, находящиеся в относительном движении, придут к согласию

о месте и времени взаимодействия между двумя частицами.

Все взаимодействие точечных частиц происходит в одной определенной точке. Когда сила, связанная со взаимодействием, представляет собой гравитационную силу, т. е. когда частица, передающая взаимодействие, является гравитоном, а не фотоном, такая упаковка всей энергии взаимодействия в одну точку ведет к катастрофическим результатам, вроде упоминавшихся ранее бесконечных ответов. В противоположность этому струны «размазывают» место, в котором происходит взаимодействие. Поскольку разные наблюдатели регистрируют взаимодействие происходящим в разных точках левой части поверхности на рис. 6.10, это означает, что точка взаимодействия в действительности размазана по всей этой области. Это увеличивает область, в которой происходит взаимодействие, и в случае гравитационной силы такое размазывание существенно смягчает ультрамикроскопические свойства, настолько, что вычисления дают нормальные конечные результаты вместо получавшихся ранее бесконечностей. Это более точная версия того размазывания, о котором шла речь в грубом ответе в предыдущем разделе. Подчеркнем еще раз, что это размазывание приводит к сглаживанию ультрамикроскопических флуктуации структуры пространства, когда субпланковские расстояния сливаются друг с другом.

Субпланковские детали, которые были бы доступны для изучения с помощью точечных частиц, в теории струн смазываются и предстают в безобидном виде. Это подобно тому, что происходит, если смотреть на мир через слишком слабые или слишком сильные очки. Однако, если теория струн представляет собой окончательное описание мироздания, то в отличие от случая плохого зрения здесь уже не существует никаких «корректирующих линз», через которые смогли бы отчетливо проявиться предполагаемые субпланковские флуктуации. Несовместимости общей теории относительности и квантовой механики, проявляющейся только в масштабе субпланковских расстояний, можно избежать во Вселенной, где есть нижний предел для расстояний, которые доступны для исследований или которые существуют в обычном смысле этого слова. Такова Вселенная, описываемая теорией струн: в ней законы макромира и микромира могут быть без ущерба объединены, после того как мы покончили с воображаемой катастрофой, возникающей на ультрамикроскопических расстояниях.

Не только струны?

Струны имеют две важных особенности. Во-первых, несмотря на конечность пространственных размеров, они могут быть непротиворечиво описаны в рамках квантовой механики. Во-вторых, среди резонансных мод колебаний имеется мода, свойства которой в точности совпадают со свойствами гравитона: тем самым гарантируется, что гравитационное взаимодействие представляет собой неотъемлемую часть этой теории. Однако, как мы помним, теория струн показала, что принятое понятие нульмерной точечной частицы оказалось не более чем математической идеализацией, не имеющей отношения к действительности. Не может ли быть так, что бесконечно тонкая одномерная струна представляет собой такую же математическую идеализацию? Может быть, одномерная струна на самом деле имеет какую-то толщину, подобно внутренней поверхности двумерной велосипедной шины или, если быть более реалистичными, подобно тонкой трехмерной баранке? Но трудности, с которыми столкнулись Гейзенберг, Дирак и другие в попытках построить квантовую теорию трехмерных фундаментальных комочков, выглядели непреодолимыми и вновь и вновь ставили в тупик исследователей, старавшихся пойти столь естественным путем.

Однако в середине 1990-х гг. специалисты по теории струн, используя косвенные и довольно сложные рассуждения, несколько неожиданно установили, что подобные фундаментальные объекты действительно играют важную и нетривиальную роль в самой теории струн. Исследователи постепенно осознали, что теория струн содержит не только струны. Важнейшее наблюдение, играющее центральную роль во второй революции в

теории суперструн, начатой Виттеном и его коллегами в 1995 г., состоит в том, что теория суперструн в действительности включает в себя компоненты различной размерности: элементы, похожие на двумерные фрисби-диски, на трехмерные капли, и даже еще более экзотические конструкции. Эти новейшие достижения будут рассмотрены в главах 12 и 13. А пока будем следовать хронологии открытий и обсудим новые поразительные свойства Вселенной, состоящей не из нульмерных точечных частиц, а из одномерных струн

Глава 7. «Супер» в суперструнах

Когда в ходе экспедиции Эддингтона 1919 г., организованной для проверки предсказаний Эйнштейна об отклонении света звезд Солнцем, был получен положительный результат, голландский физик Хендрик Лоренц известил об этом Эйнштейна телеграммой. Когда содержание телеграммы, подтверждающей общую теорию относительности, распространилось по всему миру, один студент задал Эйнштейну вопрос, о чем бы он подумал, если бы эксперимент Эддингтона не обнаружил предсказанного отклонения лучей света звезд. Эйнштейн ответил: «Мне было бы жаль Всевышнего, поскольку теория верна»1). Конечно же, если бы эксперименты действительно не подтвердили предсказаний Эйнштейна, его теория была бы признана неверной, и общая теория относительности не стала бы одним из столпов, на которых покоится современная физика. На самом деле Эйнштейн имел в виду, что общая теория относительности описывает гравитацию с таким изяществом, используя такие простые и в то же время мощные идеи, что он не мог себе представить, как природа могла пройти мимо этой возможности. С точки зрения Эйнштейна общая теория относительности была слишком красивой, чтобы оказаться неверной.

Однако эстетические аргументы не решают научных споров. В конечном счете, истинность физических теорий проверяется тем, насколько успешно они объясняют бесстрастные и упрямые экспериментальные данные. Однако к этому последнему утверждению есть одна очень важная оговорка. Когда теория находится в стадии разработки, ее неполнота часто не позволяет детально установить все ее экспериментальные следствия. Тем не менее, физики должны определить свой выбор и указать направления, в которых будут развиваться исследования такой незавершенной теории. Некоторые из этих решений диктуются внутренней логической непротиворечивостью; мы определенно требуем, чтобы любая разумная теория не содержала логически абсурдных положений. Другие решения обусловлены преимуществами одних теоретических конструкций над другими с точки зрения их следствий для экспериментальных исследований; обычно нас мало интересуют теории, содержимое которых не имеет отношения ни к чему, с чем мы сталкиваемся в окружающем нас мире. Однако, несомненно, бывают случаи, когда решения, принимаемые физиками-теоретиками, основываются на эстетических соображениях, на ощущении того, что красота и элегантность той или иной теории соответствует красоте и элегантности окружающего нас мира. Конечно, нет никаких гарантий, что такие соображения приведут нас к истине. Может быть, глубоко в своей основе структура мироздания менее элегантна, чем та, которую подсказывает наш опыт. Или, возможно, мы обнаружим, что современные эстетические критерии потребуют существенного пересмотра для применения в менее привычных условиях. Тем не менее, всегда и особенно сегодня, когда мы вступаем в эру, где наши теории описывают такие сферы мироздания, которые все труднее поддаются экспериментальному изучению, физики будут рассчитывать на то, что подобные эстетические соображения помогут избежать тупиковых направлений. До настоящего времени такой подход не раз демонстрировал свою мощь и предсказательную силу.

В физике, как и в искусстве, одну из ключевых ролей в эстетических принципах играет симметрия. Однако в отличие от искусства, в физике понятие симметрии имеет очень конкретный и точный смысл. На самом деле, аккуратно облекая это точное понятие симметрии в математическую форму, в течение последних нескольких десятилетий физики смогли разработать теории, в которых частицы вещества и частицы, передающие

взаимодействие, переплетены более тесно, чем это считалось возможным когда-либо ранее. Подобные теории, объединяющие не только существующие в природе взаимодействия, но и материальные компоненты, имеют максимально возможную степень симметрии. По этой причине такие теории получили название суперсимметричных. Как мы увидим ниже, теория суперструн является одновременно предтечей и кульминацией суперсимметричных моделей.

Характер физических законов

Вообразим себе Вселенную, в которой законы физики являются такими же недолговечными, как и течения в моде, меняясь от года к году, день ото дня или даже от мгновения к мгновению. Можно утверждать наверняка, что если эти изменения не нарушат основных жизненных процессов, в таком мире вам некогда будет скучать. Простейшие действия превратятся в захватывающие приключения, поскольку случайные изменения законов природы не позволят вам или кому-либо еще использовать прошлый опыт для предсказания будущего.

Такая Вселенная была бы кошмаром для физика. Физики, как и большинство остальных людей, полагаются на стабильность мироздания: законы, которые истинны сегодня, были истинны вчера и останутся истинными завтра (даже если мы не настолько умны, чтобы понимать все эти законы). В конце концов, какой смысл следует вкладывать в слово «закон», если он может меняться столь незакономерно? Сказанное не означает, что Вселенная статична; Вселенная, несомненно, изменяется самым разнообразным образом от одного момента времени к другому. Скорее, это означает, что законы, управляющие подобной эволюцией, постоянны и неизменны. Возникает вопрос: действительно ли мы знаем, что это верно? На самом деле, не знаем. Однако наши успехи в описании многочисленных особенностей устройства мироздания, начиная от первого момента после Большого взрыва и по сегодняшний день, дают уверенность в том, что если законы природы и изменяются, то они должны делать это очень медленно. Простейшее предположение, согласующееся с тем, что нам известно на сегодняшний день, состоит в том, что законы природы неизменны. Теперь представим себе Вселенную, в разных частях которой свои законы физики, и эти законы, как местные обычаи, изменяются непредсказуемым образом от места к месту и отчаянно сопротивляются любому внешнему влиянию. Путешествие в таком мире, подобно приключениям Гулливера, заставит вас столкнуться с огромным разнообразием непредвиденных ситуаций. Однако с точки зрения физика это опять будет кошмаром. Очень трудно, например, примириться с фактом, что законы, которые действуют в одной стране – или даже в одном штате, – могут не действовать в другом. Но попробуйте представить, что произойдет, если таким же образом будут меняться законы природы. В таком мире эксперименты, проведенные в одном месте, не дадут никакой информации о физических законах, действующих в других местах. Физики должны будут снова и снова повторять свои эксперименты в разных местах, чтобы установить характер действующих там физических законов. К счастью, все, что мы знаем на сегодняшний день, говорит о том, что повсеместно действуют одни и те же законы физики. Эксперименты, проводимые по всему миру, могут быть объяснены на основе одних и тех же физических принципов. Более того, наша способность объяснить многочисленные астрофизические наблюдения, относящиеся к самым удаленным уголкам Вселенной, используя один и тот же неизменный набор физических принципов, заставляет нас верить в то, что действительно повсюду правят одни и те же физические законы. Поскольку мы никогда не бывали на противоположном краю Вселенной, мы не можем исключить возможность того, что где-то физика имеет совершенно иной характер, но все известные нам данные заставляют отвергнуть такой вариант.

Опять же, сказанное не означает, что Вселенная выглядит одинаково или что детали ее устройства одинаковы в разных местах. Космонавт, скачущий по Луне на «кузнечике» (палке с пружиной), способен проделать массу вещей, которые невозможно себе представить на Земле. Но мы понимаем, что это различие связано с тем, что Луна имеет гораздо меньшую

массу, чем Земля; это вовсе не означает, что закон гравитации изменяется от одного места к другому. Ньютоновский или, точнее, эйнштейновский закон гравитации является одинаковым и для Земли, и для Луны. Различия в опыте космонавтов связаны с изменением обстановки, а не с изменением физических законов.

Физики называют эти два свойства физических законов, а именно то, что они не зависят от того, когда или где мы их применяем, симметриями природы. Используя этот термин, физики имеют в виду, что природа трактует каждый момент во времени и каждую точку в пространстве идентично, симметрично, гарантируя, что будут действовать одни и те же фундаментальные законы. Подобно их действию в живописи и в музыке, такие виды симметрии вызывают глубокое удовлетворение: они подчеркивают порядок и согласие в функционировании мироздания. Элегантность, с которой богатые, сложные и разнообразные явления вытекают из простого набора универсальных законов, составляет немалую часть того, что имеют в виду физики, используя слово «прекрасный».

В нашем обсуждении, посвященном специальной и общей теории относительности, мы столкнулись и с другими видами симметрии в природе. Вспомним, что принцип относительности, который лежит в основе специальной теории относительности, гласит, что законы физики будут одинаковы для наблюдателей, движущихся равномерно относительно друг друга. Этот принцип представляет собой разновидность симметрии, поскольку он означает, что природа относится к наблюдателям совершенно одинаково, симметрично. Каждый такой наблюдатель имеет право считать, что он находится в состоянии покоя. Подчеркнем еще раз, что это не означает идентичности картины, которую будут видеть разные наблюдатели; как мы показали ранее, их наблюдения могут существенно расходиться. Дело не в этом. Подобно различиям в ощущениях энтузиастов прыжков на палках с пружиной на Земле и на Луне, различия в наблюдениях отражают особенности обстановки, в которой проводились наблюдения, ведь наблюдатели находились в относительном движении. Но то, что они наблюдали, управлялось одними и теми же законами.

Открыв принцип эквивалентности, основу общей теории относительности, Эйнштейн значительно расширил этот тип симметрии. Он показал, что законы физики в действительности идентичны для всех наблюдателей, даже для тех, которые находятся в состоянии сложного ускоренного движения. Вспомним, что Эйнштейн придал этой идее законченный вид, осознав, что ускоряющийся наблюдатель имеет полное право считать, что он находится в состоянии покоя, утверждая, что сила, действующая на него, обусловлена гравитационным полем. После включения в данную систему гравитации все возможные точки зрения становятся абсолютно равноправными. Помимо несомненной эстетической привлекательности такой равноправной трактовки всех видов движения, эти принципы симметрии, как мы видели выше, играют ключевую роль в поразительных выводах о характере гравитации, к которым пришел Эйнштейн.

Есть ли еще принципы симметрии, имеющие дело с пространством, временем и движением, которым должны удовлетворять законы физики? Если вы основательно поразмыслите об этом, то сможете указать еще один принцип. Законы физики не должны зависеть от того, под каким углом вы проводите свои наблюдения. Например, если вы проводите какой-то эксперимент и после этого решаете повернуть вашу установку и повторить опыт, должны действовать те же самые законы. Этот принцип известен под названием вращательной симметрии, он означает, что законы физики трактуют все возможные направления как равноправные. Данный принцип симметрии имеет такое же значение, как и рассмотренные выше.

Существуют ли какие-либо еще принципы симметрии? Не пропустили ли мы какой-нибудь из них? Вы можете предложить калибровочные симметрии, связанные с негравитационными силами, обсуждавшиеся в главе 5. Да, это несомненные симметрии в природе, но они являются более абстрактными по своему характеру; в данный момент мы хотим сконцентрировать наше внимание на тех видах симметрии, которые имеют

непосредственное отношение к пространству, времени или движению. Если добавить это условие, по всей вероятности, вам не удастся предложить чего-либо нового. На самом деле в 1967 г. физики Сидни Коулмен и Джеффри Мандула сумели доказать, что никакие другие виды симметрии, связанные с пространством, временем или движением, не могут сочетаться с принципами симметрии, рассмотренными выше, и приводить к теории, имеющей какое-либо отношение к нашему миру.

Однако впоследствии более тщательное изучение этой теоремы, основанное на догадках ряда физиков, позволило обнаружить одну небольшую лазейку: результат Коулмена-Мандулы не охватывает симметрии, связанные с понятием, известным как спин.

Спин

Элементарные частицы, например электрон, могут вращаться вокруг атомных ядер подобно тому, как Земля вращается вокруг Солнца. Однако может показаться, что в традиционной точечной модели электрона нет аналога вращению Земли вокруг своей оси. Когда объект вращается, точки, расположенные на оси вращения, подобно центральной точке фрисби-диска, остаются неподвижными. Но если какой-нибудь объект является действительно точечным, у него нет «других точек», которые не находились бы на оси вращения. В результате может показаться, что такого понятия, как вращение точечного объекта, попросту не существует. Много лет назад исследование этого вопроса привело к открытию еще одного поразительного квантового эффекта.

В 1925 г. голландские физики Джордж Уленбек и Сэмюэль Гоудсмит осознали, что многие удивительные результаты, относящиеся к свойствам излучаемого и поглощаемого атомами света могут быть объяснены, если предположить, что электроны обладают некоторыми весьма специфичными магнитными свойствами. Примерно за сто лет до этого французский физик Андре-Мари Ампер показал, что магнетизм обязан своим происхождением движению электрических зарядов. Уленбек и Гоудсмит исследовали этот факт и установили, что только один конкретный вид движения электрона может привести к появлению магнитных свойств, на которые указывали экспериментальные данные: это было вращательное движение – спин электрона. Вопреки канонам классической физики, Уленбек и Гоудсмит провозгласили, что электрон, подобно Земле, может кружить по орбите и одновременно вращаться вокруг собственной оси.

Считали ли Уленбек и Гоудсмит, что электрон действительна вращается вокруг своей оси? И да, и нет. На самом деле их работа показала, что существует квантово-механическое понятие спина, которое в определенной степени напоминает вращение объекта вокруг собственной оси, но которое, по сути, представляет квантово-механическое явление. Это одно из тех свойств микромира, которое не имеет аналога в классической физике, а является экспериментально подтверждаемой квантовой особенностью. Представьте себе, например, вращающегося фигуриста. Когда он прижимает руки к телу, его вращение ускоряется, когда разводит руки в стороны – вращение замедляется. Однако рано или поздно, в зависимости от того, с какой энергией он начал свое вращение, его движение замедлится, и он остановится. Не так обстоят дела со спином, открытым Уленбеком и Гоудсмитом. Согласно их работе и данным последующих исследований, каждый электрон во Вселенной всегда вращается с постоянной и никогда не меняющейся скоростью. Спин электрона не является промежуточным состоянием движения, которое мы наблюдаем в случае более привычных объектов, по тем или иным причинам пришедших во вращение. Напротив, спин электрона является внутренним, присущим электрону свойством, похожим в этом отношении на массу или электрический заряд. Если бы электрон не вращался, он не был бы электроном.

Хотя первые работы были посвящены электронам, впоследствии физики показали, что понятие спина применимо ко всем частицам вещества, образующим три семейства из табл. 1.1. Это утверждение истинно вплоть до мельчайших деталей: все частицы вещества (а также их античастицы) имеют спин, равный спину электрона. На своем специальном языке физики

говорят, что все частицы вещества имеют «спин 1/2», где значение 1/2 представляет собой, грубо говоря, квантово-механическую меру скорости вращения частиц 2). Более того, физики показали, что частицы, передающие негравитационные взаимодействия, – фотоны, слабые калибровочные бозоны и глюоны – также обладают спином, который оказался в два раза больше, чем спин частиц вещества. Все эти частицы имеют «спин 1».

А как насчет гравитации? Еще до появления теории струн физики смогли установить, какой спин должен иметь гипотетический гравитон, чтобы он мог переносить гравитационное взаимодействие. Полученный ими ответ гласил: удвоенный спин фотонов, слабых калибровочных бозонов и глюонов – т. е. «спин 2».

В теории струн спин, так же как масса и константы других взаимодействий, связан с модой колебания струны. Как и в случае с точечными частицами, было бы не совсем правильно думать, что спин, который несет струна, возникает из-за того, что она действительно вращается в пространстве, однако эта картина дает хороший образ для представления. Кстати, теперь можно уточнить одно важное обстоятельство, с которым мы столкнулись ранее. В 1974 г. Шерк и Шварц провозгласили, что теория струн должна рассматриваться как квантовая теория, включающая гравитационное взаимодействие. Такой вывод стал возможен потому, что они обнаружили: в спектре колебаний струн обязательно должна присутствовать мода, которая соответствует безмассовой частице со спином 2. Но именно эти характеристики являются отличительными признаками гравитона. А где гравитон, там и гравитация.

Получив основные представления о спине, вернемся к той роли, которую он играет в качестве упомянутой в предыдущем разделе лазейки в обход теоремы Коулмена– Мандулы, касающейся возможных видов симметрии в природе.

Суперсимметрия и суперпартнеры

Как мы уже подчеркивали, хотя понятие спина имеет поверхностное сходство с образом вращающегося волчка, оно имеет и значительные отличия, связанные с его квантовой природой. Открытие спина в 1925 г. показало, что имеется еще один вид вращательного движения, который попросту не существует в чисто классической Вселенной.

Это позволяет задать следующий вопрос: если обычное вращательное движение приводит к принципу симметрии, носящему название инвариантности относительно вращений («физика рассматривает все возможные направления в пространстве как равноправные»), не ведет ли это более специфическое вращательное движение еще к одному принципу симметрии законов природы? Примерно к 1971 г. физики показали, что ответ на этот вопрос положителен. Хотя полное доказательство достаточно сложно, основная идея состоит в том, что если рассматривать спин с математической точки зрения, возможна ровно одна дополнительная симметрия законов природы. Она получила название суперсимметрии3).

Суперсимметрии не может быть поставлено в соответствие простое и интуитивно понятное изменение точки зрения наблюдателя: сдвиги во времени, пространственном положении, угловой ориентации и скорости движения уже исчерпали эти возможности. Однако поскольку спин представляет собой «подобие вращательного движения, имеющее квантово-механическую природу», суперсимметрия связана с изменением точки зрения наблюдателя в «квантово-механическом расширении пространства и времени».

Кавычки здесь очень важны, поскольку последняя фраза дает только общее представление о месте суперсимметрии в общей системе принципов симметрии природы4'. Однако понимание принципа суперсимметрии является довольно сложной задачей, и мы сконцентрируем внимание на его основных следствиях, на том, согласуются ли законы природы с этим принципом. Этот вопрос гораздо легче поддается объяснению.

В начале 1970-х гг. физики пришли к выводу, что если Вселенная является суперсимметричной, частицы природы должны входить в набор наблюдаемых частиц

парами, при этом спин частиц, образующих пару, должен отличаться на 1/2. Такие пары частиц – независимо от того, считаются ли они точечными (как в стандартной модели) или крошечными колеблющимися петлями – называются суперпартнерами. Поскольку частицы вещества имеют спин 1/2, а некоторые из частиц, передающих взаимодействие – спин 1, суперсимметрия приводит к выводу о наличии пар, о партнерстве частиц вещества и частиц, передающих взаимодействие. Сам по себе этот вывод выглядит весьма привлекательно с точки зрения объединения частиц в одну теорию. Проблема кроется в деталях.

К середине 1970-х гг., когда физики искали способ, который позволил бы включить суперсимметрию в стандартную модель, они обнаружили, что ни одна из известных частиц, перечисленных в табл. 1.1 и 1.2, не может быть суперпартнером для другой. Как показал тщательный теоретический анализ, если Вселенная включает принцип суперсимметрии, то каждой известной частице должна соответствовать еще не открытая частица-суперпартнер, спин которой на половину меньше, чем спин ее известного партнера. Так, партнер электрона должен иметь спин 0; эта гипотетическая частица получила название сэлектрона (сокращение от термина суперсимметричный электрон). То же самое справедливо и для других частиц вещества. Например, имеющие спин 0 гипотетические суперпартнеры нейтрино и кварков получили название снейтрино и скварков. Аналогично частицы, передающие взаимодействия, должны иметь суперпартнеров со спином 1/2. Для фотонов это будут фотино, для глюонов – глюино, для W-бозонов и Z -бозонов – вино и зино.

Таким образом, при более внимательном изучении суперсимметрия оказалась чрезвычайно неэкономичным понятием: она требовала большого количества дополнительных частиц, дублировавших список фундаментальных компонентов. Поскольку ни одна из частиц-суперпартнеров не была обнаружена, вы можете довольствоваться приведенным в главе 1 замечанием Раби по поводу открытия мюона, немного усилив его звучание: «Никто не заказывал суперсимметрию», и, без долгих рассуждений, отказаться от этого принципа симметрии. Существуют, однако, три причины, по которым многие физики твердо убеждены, что такой скоропалительный отказ от суперсимметрии был бы преждевременным. Обсудим эти причины.

Доводы в пользу суперсимметрии – до появления теории струн

Во-первых, с чисто эстетических позиций, физики не могли примириться с тем, что природа реализовала почти все, но не все математически возможные виды симметрии. Конечно, нельзя исключать возможность того, что симметрия реализуется не полностью, но это было бы так обидно. Это было бы похоже на то, как если бы Бах, написав многоголосные переплетающиеся партии, встроенные в гениальную картину музыкальной симметрии, забыл про финал, расставляющий все по своим местам.

Во-вторых, даже в стандартной модели, в теории, которая игнорирует гравитацию, многочисленные технические трудности, связанные с квантовыми эффектами, безболезненно разрешаются при использовании суперсимметрии. Основная проблема состоит в том, что каждый отдельный вид частиц вносит свой собственный вклад в микроскопический квантовый хаос. Исследуя глубины этого хаоса, физики обнаружили, что некоторые процессы, связанные со взаимодействием частиц, можно описать непротиворечивым образом только при очень точной настройке параметров стандартной модели, с точностью, превышающей 10-15, для нейтрализации наиболее разрушительных квантовых эффектов. Для сравнения: такая точность необходима для того, чтобы пуля, выпущенная из воображаемого сверхмощного ружья, попала в цель на Луне с отклонением, не превышающим размеры амебы. Хотя стандартная модель допускает регулировку параметров с такой точностью, многие физики испытывают сильное недоверие к теории, которая устроена настолько деликатно, что разваливается, если параметр, от которого она зависит, изменяется на единицу в пятнадцатом разряде после запятой5'.

Суперсимметрия радикальным образом изменяет эту ситуацию, поскольку бозоны –

частицы, имеющие целочисленный спин (получившие свое название в честь индийского физика Сатьендры Бозе), и фермионы – частицы, спин которых равен половине целого (нечетного) числа (названные в честь итальянского физика Энрико Ферми), имеют тенденцию вносить такие вклады в квантовый хаос, которые взаимно сокращаются. Вклады как будто находятся на противоположных концах коромысла: когда вклад бозонов в квантовые флуктуации положителен, вклад фермионов отрицателен, и наоборот. Поскольку суперсимметрия гарантирует, что бозоны и ферм ионы существуют парами, происходит изначальное сокращение, которое существенно уменьшает самые интенсивные квантовые флуктуации. В результате непротиворечивость суперсимметричной стандартной модели, в которую включены все частицы-суперпартнеры, перестает зависеть от подозрительно тонкой регулировки значений параметров обычной стандартной модели. Хотя этот момент кажется сугубо техническим, он делает суперсимметрию очень привлекательной в глазах многих специалистов по физике элементарных частиц.

Третье косвенное доказательство в пользу суперсимметрии связано с понятием великого объединения. Одно из самых загадочных свойств четырех фундаментальных взаимодействий природы состоит в огромных различиях интенсивности этих взаимодействий. Интенсивность электромагнитных сил не превышает одного процента от интенсивности сильного взаимодействия. Слабое взаимодействие примерно в тысячу раз слабее электромагнитного, а интенсивность гравитационных сил слабее еще в несколько сотен миллионов миллиардов миллиардов миллиардов (10-35) раз. Следуя удостоенной Нобелевской премии пионерской работе Глэшоу, Салама и Вайнберга, установившей глубокую связь между электромагнитным и слабым взаимодействием (см. главу 5), Глэшоу и его коллега по Гарвардскому университету Говард Джорджи предположили, что подобную связь можно протянуть и к сильному взаимодействию. Их работа, предлагавшая «великое объединение» трех из четырех взаимодействий, имела одно существенное отличие от электрослабой теории. Электромагнитное и слабое взаимодействия выкристаллизовались из более симметричного состояния, когда температура Вселенной упала примерно до миллиона миллиардов градусов выше абсолютного нуля (1015 К). Джорджи и Глэшоу показали, что объединение с сильным взаимодействием становится очевидным только при температуре, которая еще в десять триллионов раз выше, примерно при десяти миллиардах миллиардов миллиардов миллиардов градусов выше абсолютного нуля (при 1028 К). С точки зрения энергии это примерно в миллион миллиардов раз больше массы протона, или примерно на четыре порядка меньше планковской массы. Джорджи и Глэшоу дерзко направили теоретическую физику в область энергий, на много порядков превышающих те, с которыми исследователи отваживались иметь дело раньше.

Следующая работа, выполненная Джорджи, Хелен Куинн и Вайнбергом в 1974 г. в Гарварде, с еще большей очевидностью показала возможность объединения негравитационных взаимодействий в рамках теории великого объединения. Поскольку их вклад продолжает играть важную роль в объединении взаимодействий и исследовании суперсимметрии природы, потратим немного времени на то, чтобы объяснить его более подробно.

Мы знаем, что электромагнитное притяжение между двумя противоположно заряженными частицами и гравитационное притяжение между двумя массивными телами увеличивается при уменьшении расстояния между объектами. Это простые и хорошо известные факты из классической физики. Сюрпризы начинаются, когда мы исследуем влияние квантовой физики на интенсивность взаимодействий. Почему вообще квантовая механика оказывает какое-либо влияние на эти явления? Ответ опять же связан с квантовыми флуктуациями. Когда мы исследуем электрическое поле электрона, на самом деле мы исследуем его сквозь «туман» электрон-позитронных пар, непрерывно рождающихся и аннигилирующих в окружающей его области пространства. Некоторое время назад физики осознали, что этот кипящий туман микроскопических флуктуации маскирует истинную напряженность поля, создаваемого электроном, подобно тому, как

туман в природе ослабляет луч маяка. По мере того, как мы приближаемся к электрону, мы проникаем все глубже в обволакивающий его туман, состоящий из частиц и античастиц, и поэтому такой туман будет оказывать меньшее влияние на наши наблюдения. Из этого следует, что по мере приближения к электрону напряженность создаваемого им электрического поля будет возрастать.

Физики отличают это возрастание напряженности при приближении к электрону, связанное с квантовыми эффектами, от собственной напряженности электромагнитного взаимодействия, возрастающей с уменьшением расстояния. Таким образом, напряженность возрастает не просто потому, что мы приближаемся к электрону, но также вследствие того, что становится видимым собственное электрическое поле электрона. Хотя мы рассматривали электрон, на самом деле эти выводы применимы к любым частицам, несущим электрический заряд. Их можно суммировать утверждением, что квантовые эффекты ведут к росту электромагнитных сил при уменьшении расстояния.

А что можно сказать о других взаимодействиях, описываемых стандартной моделью? Как изменяется их интенсивность с изменением расстояния? В 1973 г. Гросс и Фрэнк Вильчек из Принстона и независимо от них Дэвид Политцер из Гарварда исследовали этот вопрос и получили удивительный результат. Квантовое облако, состоящее из рождающихся и аннигилирующих частиц, увеличивает интенсивность сильного и слабого взаимодействия. Это означает, что когда мы исследуем эти взаимодействия на более близких расстояниях, мы проникаем глубже в кипящее облако квантовых флуктуации, и, следовательно, увеличение интенсивности ощущается менее заметно. Таким образом, интенсивность этих видов взаимодействия уменьшается при уменьшении расстояния, на котором мы их исследуем.

Джорджи, Куинн и Вайнберг использовали эти идеи и довели их до замечательного финала. Они показали, что если аккуратно учесть влияние всех этих квантовых флуктуации, то мы увидим, что интенсивности всех трех негравитационных взаимодействий станут сближаться. Хотя интенсивности этих трех видов взаимодействий очень сильно различаются на масштабах расстояний, доступных современной технике, согласно выводам Джорджи, Куинн и Вайнберга, это различие связано с различным влиянием, которое оказывает на них «туман» квантовых флуктуации. Их расчеты показали, что если проникнуть сквозь этот туман и исследовать взаимодействия не в обычных для нас масштабах, а на расстояниях, составляющих примерно одну сотую от миллиардной миллиардной миллиардной (10-29) доли сантиметра (приблизительно в десять тысяч раз превышающем планковскую длину), интенсивности всех трех негравитационных взаимодействий окажутся одинаковыми.

Высокие энергии, которые исследуются на таких малых расстояниях, значительно превышают те, с которыми мы обычно имеем дело, однако такие энергии были характерными для бурной и раскаленной Вселенной в момент, когда ее возраст составлял примерно одну тысячную от одной триллионной триллионной триллионной (10-39) доли секунды, а ее температура, как упоминалось выше – около 1028 К. Эти теоретические работы показали, что примерно так же, как набор самых различных ингредиентов – кусков металла, дерева, горных пород, минералов и т. п. – сплавляется в единое целое и образует однородную, гомогенную плазму при нагреве до достаточно высокой температуры, сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия при такой огромной температуре сливаются в одно величественное взаимодействие. Схематически это показано на рис. 7.1 6).

Рис. 7.1. Интенсивность трех негравитационных взаимодействий при уменьшении расстояния или (что эквивалентно) при увеличении энергии.

Хотя у нас нет устройств, с помощью которых можно было бы производить измерения на столь малых расстояниях или воспроизводить столь высокие температуры, за время, прошедшее с 1974 г., экспериментаторам удалось существенно уточнить значения интенсивности трех негравитационных взаимодействий в обычных условиях. Эти данные, являющиеся начальными точками на трех кривых изменения интенсивности взаимодействий, показанных на рис. 7.1, представляют собой исходные данные для квантово-механических расчетов, выполненных Джорджи, Куинн и Вайнбергом. В 1991 г. Уго Амальди из ЦЕРНа, Вим де Боер и Герман Фюрстенау из университета Карлсруэ в Германии пересчитали результаты Джорджи, Куинн и Вайнберга с использованием новых экспериментальных данных и продемонстрировали два замечательных факта. Во-первых, интенсивность трех негравитационных взаимодействий почти (но не абсолютно) одинакова в масштабе малых расстояний (соответственно, высоких энергий и высоких температур), как показано на рис. 7.2.

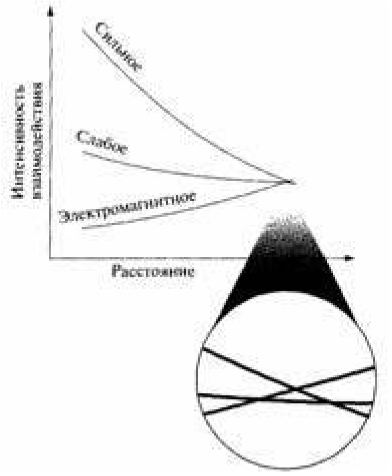

Рис. 7.2. Уточнение расчета интенсивностей взаимодействий показало, что без суперсимметрии они очень близки, но не совпадают.

Во-вторых, это незначительное, но несомненное различие в интенсивности исчезает при включении суперсимметрии. Причина состоит в том, что новые частицы-суперпартнеры, существования которых требует суперсимметрия, дают дополнительные квантовые флуктуации достаточной величины, чтобы интенсивности взаимодействий стали одинаковыми.

Для большинства физиков чрезвычайно трудно поверить в то, что природа могла выбрать взаимодействия таким образом, чтобы на микроскопическом уровне они были почти, но не в точности равны. Это все равно, как если бы вы собирали головоломку и увидели, что последний фрагмент имеет немного не ту форму, которая позволила бы ему занять последнее остающееся свободным место. Суперсимметрия искусно изменяет форму этого фрагмента, и все части головоломки встают на свои места.

Другой аспект этих последних достижений связан с тем, что они дают возможный ответ на вопрос, почему до сих пор не открыта ни одна частица-суперпартнер. Расчеты, подтвердившие равенство интенсивности взаимодействий, а также ряд других исследований, выполненных физиками, показали, что частицы-суперпартнеры должны быть намного тяжелее, чем все открытые до сих пор частицы. Хотя точный прогноз дать пока невозможно, проведенные исследования показывают, что частицы-суперпартнеры должны быть как минимум в тысячу раз тяжелее протона. Это объясняет, почему такие частицы до сих пор не обнаружены: даже самые современные ускорители не способны развивать такие энергии. В главе 9 мы вернемся к вопросу о перспективах экспериментальной проверки того, является ли суперсимметрия реальным свойством нашего мира.

Конечно, приведенные доводы в пользу того, чтобы принять суперсимметрию или, по крайней мере, не отвергать такой возможности, не являются неоспоримыми. Мы описали,

как суперсимметрия придает нашим теориям наиболее симметричный вид, но вы можете возразить, что мироздание, возможно, вовсе не стремится принять наиболее симметричную форму, достижимую с математической точки зрения. Мы обратили ваше внимание на важный технический момент, состоящий в том, что суперсимметрия избавляет нас от необходимости детальной подгонки параметров стандартной модели для преодоления ряда тонких проблем в квантовой теории, но вы можете возразить, что истинная теория, описывающая явления природы, вполне может балансировать на тонкой грани между непротиворечивостью и саморазрушением. Мы показали, что на ничтожно малых расстояниях суперсимметрия изменяет интенсивность трех негравитационных взаимодействий в точности так, чтобы они могли слиться в одно великое объединенное взаимодействие, но вы, опять же, можете возразить, что в устройстве мироздания нет ничего, что диктовало бы необходимость совпадения интенсивности этих взаимодействий на микроскопическом масштабе. Наконец, вы можете предположить, что частицы-суперпартнеры до сих пор не обнаружены просто потому, что наша Вселенная не является суперсимметричной и, следовательно, частицы-суперпартнеры не существуют.

Никто не может опровергнуть ни одно из этих возражений. Однако доводы, говорящие в пользу суперсимметрии, необычайно усиливаются, если мы рассмотрим ее роль в теории струн.

Суперсимметрия в теории струн

Первоначальный вариант теории струн, начало которой было положено работой Венециано в конце 1960-х гг., содержал все виды симметрии, которые обсуждались в первых пунктах этой главы, но не включал суперсимметрию (которая в то время еще не была открыта). Эта первая теория, базировавшаяся на концепции струн, называлась теорией бозонных струн. Слово бозонная указывает на то, что все моды колебаний бозонной струны обладали целочисленным спином: в этой теории не было фермионных мод, т. е. мод, спин которых отличался бы от целого числа на половину единицы. Это приводило к двум проблемам.

Во-первых, если назначением теории струн было описание всех взаимодействий и всех видов материи, она должна была каким-то образом включать фермионные моды колебаний, поскольку все известные частицы вещества имеют спин 1/2. Вторая, гораздо более серьезная проблема была связана с существованием в теории бозонных струн еще одной моды колебаний, масса которой (или, точнее, квадрат массы) была отрицательной, – так называемого тахиона. Возможность того, что в дополнение к более привычным частицам с положительными массами наш мир может содержать тахионы, изучалась физиками еще до появления теории струн, однако их работы показали, что создать непротиворечивую теорию, включающую тахионы, чрезвычайно трудно, если вообще возможно. Аналогичным образом физики испробовали самые фантастические способы, пытаясь придать смысл экзотической идее тахионной моды в контексте теории струн, но все попытки оказались безуспешными. Эти две проблемы показали, что хотя теория бозонных струн была весьма интересна, в ней определенно не хватало каких-то существенных элементов.

В 1971 г. Пьер Рамон из университета штата Флорида принял вызов и модифицировал теорию бозонных струн, включив в нее фермионные моды колебаний. Его работа и результаты, полученные позднее Шварцем и Андре Невье, положили начало новой версии теории струн. Ко всеобщему удивлению, в эту новую теорию бозонные и фермионные моды колебаний входили парами. Для каждой бозонной моды существовала соответствующая фермионная, и наоборот. К 1977 г. работы Фердинандо Льоцци из университета Турина, а также работы Шерка и Дэвида Олива из Имперского колледжа, показали истинный смысл этого группирования в пары. Новая теория струн включала суперсимметрию, и то, что бозонные и фермионные моды колебания входили парами, было отражением высокой степени симметрии этой теории. В этот момент родилась суперсимметричная теория струн –

теория суперструн. Работы Льоцци, Шерка и Олива дали еще один очень важный результат: они показали, что вызывавшая беспокойство тахионная мода колебаний бозонных струн не свойственна суперструнам. Части конструкции теории струн постепенно вставали на свои места.

Однако изначально основное влияние работы Рамона, Невье и Шварца оказали не на теорию струн. К 1973 г. физики Джулиус Весе и Бруно Зумино осознали, что суперсимметрия – новый вид симметрии, появившийся при изменении формулировки теории струн, – применима и к теориям, основанным на точечной модели частиц. Они быстро предприняли важные шаги в направлении включения суперсимметрии в систему квантовой теории поля, основанной на точечной модели частиц. А поскольку в это время квантовая теория поля была основным объектом исследования специалистов по физике элементарных частиц (при этом теория струн все более прочно занимала место на переднем краю исследований), за достижениями Весса и Зумино последовало огромное количество исследований в области, которая получила название суперсимметричной квантовой теории поля. Суперсимметричная стандартная модель, которую мы обсуждали в предыдущем разделе, была одним из главных теоретических достижений в этом направлении. Таким образом, благодаря зигзагам на пути развития теории струн, в большом долгу перед ней оказалась даже теория, основанная на точечной модели частиц.

С возрождением теории суперструн в середине 1980-х гг. суперсимметрия вновь вернулась в лоно, где она была впервые открыта. И в этом контексте свидетельства в пользу суперсимметрии выходят далеко за пределы того, о чем говорилось в предыдущем разделе. Теория струн представляет собой единственный известный нам способ объединения общей теории относительности и квантовой механики. При этом только суперсимметричная версия теории струн позволяет избежать фатальной тахионной проблемы и содержит фермионные моды колебаний, соответствующие частицам вещества, составляющим окружающий нас мир. Таким образом, суперсимметрия идет рука об руку с теорией струн и тем, что она дает для квантовой теории гравитации и для решения грандиозной задачи великого объединения всех видов взаимодействия и всех частиц материи. Физики полагают, что если теория струн верна, то верна и идея суперсимметрии.

Однако до середины 1990-х гг. в суперсимметричной теории струн была одна весьма серьезная проблема.

Суперпроблема изобилия

Если кто-нибудь скажет вам, что он разгадал тайну судьбы Амелии Эрхарт (Амелия Эрхарт (Amelia Earhart) – первая американка, совершившая в одиночку перелет через Атлантический океан. В 1935 г. совершила рекордный одиночный перелет с Гавайских островов в Калифорнию. Пропала без вести в районе Новой Гвинеи при попытке совершить первый перелет вокруг света. – Прим. перев.), наверное, сначала вы отнесетесь к его словам скептически, но если он предоставит вам подтвержденные документами серьезные свидетельства, вы, скорее всего, дослушаете этого человека до конца и, кто знает, может быть, он даже убедит вас. Но что вы подумаете, если спустя мгновение он сообщит вам, что у него есть еще одно объяснение? Вы терпеливо слушаете и, к своему удивлению, обнаруживаете, что альтернативное объяснение столь же хорошо документировано и продумано, как и первое. После завершения рассказа о новом объяснении вам будет представлено третье, четвертое и даже пятое объяснения, и каждое из них будет отличаться от предыдущих, но будет столь же хорошо подкреплено доказательствами. Нет никаких сомнений, что к концу вашей беседы вы будете чувствовать себя не ближе к решению загадки судьбы Амелии Эрхарт, чем вы были вначале. В области фундаментальных объяснений слово «больше» определенно означает «меньше».

К 1985 г. теория струн, несмотря на заслуженное восхищение, которое она вызывала, начала звучать подобно чересчур рьяному эксперту по судьбе Амелии Эрхарт. Причина

состояла в том, что к 1985 г. физики осознали, что суперсимметрия, являющаяся центральным звеном теории струн, на самом деле может быть включена в нее не одним, а пятью различными способами. Каждый метод приводил к образованию пар бозонных и фермионных мод колебания, но детали такой группировки, а также многочисленные другие свойства получавшихся теорий, существенно различались. Хотя названия, которые получили эти теории, не имеют большой важности, потрудимся запомнить, что это были: теория струн типа I, теория струн типа IIA, теория струн типа IIB, теория гетеротических струн 0(32) (произносится «о тридцать два»), а также теория гетеротических струн E8 x E8 (произносится «е восемь на е восемь»). Все особенности теории струн, которые мы обсуждали до сих пор, справедливы для каждой из этих теорий, они различаются только в более тонких деталях.

Иметь пять различных версий того, что считалось теорией всего, т. е. возможной конечной объединяющей теорией, было слишком много для специалистов по теории струн. Как существует только одно правдивое объяснение того, что случилось с Амелией Эрхарт (независимо от того, узнаем ли мы его когда-нибудь), так и наиболее глубокое, фундаментальное понимание устройства мироздания, согласно нашим представлениям, может быть только одним. Мы живем в одной Вселенной и ожидаем существование только одного объяснения.

Одно из решений этой проблемы может быть следующим. Хотя у нас есть пять различных теорий суперструн, четыре лишних можно отбросить с помощью экспериментальных исследований, и в результате останется одна, истинная формулировка. Но даже если это удалось бы сделать, у нас все равно остался бы саднящий вопрос – откуда возникли другие теории. Немного перефразируя Виттена: «Если одна из пяти теорий описывает нашу Вселенную, то кто живет в четырех остальных?»7) Мечта физика состоит в том, чтобы его поиск окончательных ответов привел к одному, уникальному, совершенно неизбежному выводу. В идеале окончательная теория, будь то теория струн или что-то иное, должна быть такой, какова она есть, просто потому, что другого способа не существует. Если бы мы открыли, что существует только одна логически непротиворечивая теория, объединяющая основные компоненты общей теории относительности и квантовой механики, многие почувствовали бы, что достигнуто глубочайшее понимание того, почему мироздание имеет те свойства, которые оно имеет. Короче говоря, наступили бы райские времена единой теории8).

Как мы увидим в главе 12, последние исследования в теории суперструн позволили сделать гигантский шаг в направлении этой единой утопии, показав, что пять различных теорий в действительности представляют собой пять различных способов описания одной и той же объединяющей теории. Теория суперструн имеет единое генеалогическое древо.

Все, похоже, постепенно становится на свои места. Однако, как мы увидим в следующей главе, объединение в рамках теории струн требует еще одного, более радикального отказа от наших обычных представлений.

Глава 8. Измерений больше, чем видит глаз

Эйнштейн в своей специальной и общей теории относительности разрешил два основных противоречия физики последнего столетия. Хотя проблемы, послужившие побудительным мотивом его работ, вовсе не предвещали такого результата, каждое из этих решений полностью трансформировало наше понимание пространства и времени. Теория струн разрешила третий главный конфликт в физике прошлого века, причем таким способом, который, наверное, восхитил бы даже Эйнштейна, и потребовала очередного коренного пересмотра наших понятий пространства и времени. Сотрясение основ современной физики было столь сильным, что не устояли даже наши представления о числе измерений во Вселенной, казавшиеся совершенно незыблемыми и, тем не менее, подвергшиеся радикальному и убедительному изменению.

Иллюзия привычного

Наша интуиция питается жизненным опытом. Но этим роль опыта не ограничивается: он формирует опорный каркас, в рамках которого мы анализируем и интерпретируем полученную из окружающего мира информацию. Например, вряд ли вы будете сомневаться, что Маугли, воспитанный стаей диких волков, будет интерпретировать окружающую действительность совсем иначе, чем мы. Даже менее сильные различия, например, различия между людьми, воспитанными в существенно разных культурных традициях, подчеркивают ту роль, которую играет жизненный опыт в восприятии мира. Однако есть явления, воздействие которых испытывают все. И часто именно убеждения и ожидания, основанные на таком универсальном опыте, труднее всего поддаются определению и пересмотру. Простой, но глубокий пример состоит в следующем. Закрыв эту книгу и встав со стула, вы можете двигаться в трех независимых направлениях – т. е. в трех независимых пространственных измерениях. Каким бы путем вы не последовали, – независимо от того, насколько сложным он будет, – результат может быть описан как комбинация перемещений в трех направлениях: «влево-вправо», «вперед-назад» и «вверх-вниз». Каждый раз, когда вы делаете очередной шаг, вы неявно делаете три независимых выбора, определяющих ваше движение в этих трех измерениях.

Эквивалентное утверждение, с которым мы столкнулись, рассматривая специальную теорию относительности, заключается в том, что любая точка Вселенной может быть однозначно определена тремя параметрами, указывающими ее положение в этих трех пространственных измерениях. Например, вы можете описать адрес в городе, указав стрит (положение в измерении «влево-вправо»), авеню (положение в измерении «вперед-назад») и этаж (положение в измерении «вверх-вниз»). Работы Эйнштейна показали нам, что время может рассматриваться как еще одно измерение (измерение «будущее-прошлое»), что увеличивает общее число измерений до четырех (три пространственных и одно временное). Вы определяете события во Вселенной, указывая, где и когда они произошли.

Эта особенность Вселенной кажется столь фундаментальной и естественной, что обычно даже не упоминается. Тем не менее, в 1919 г. малоизвестный польский математик Теодор Калуца из Кенигсбергского университета дерзнул бросить вызов очевидному – он предположил, что в действительности Вселенная может иметь не три измерения, число измерений может быть больше. Иногда предположения, звучащие бессмысленно, таковыми и являются. Иногда они потрясают основы физики. Хотя потребовалось некоторое время на то, чтобы предположение Калуцы получило общее признание, оно привело к революции в формулировке физических законов. Отзвуки этого провидческого прозрения мы слышим до сих пор.

Идея Калуцы и уточнение Клейна

Предположение о том, что наша Вселенная может иметь более трех пространственных измерений, может показаться бессмысленным, эксцентричным или мистическим. Однако в действительности оно является вполне реальным и тщательно обоснованным. Убедиться в этом будет проще, если на время оставить в покое Вселенную и рассмотреть более привычный объект, например длинный и тонкий Садовый шланг.

Представим, что несколько сотен метров Садового шланга протянуто поперек каньона, и мы наблюдаем его с расстояния, скажем, в километр, как показано на рис. 8.1 а.

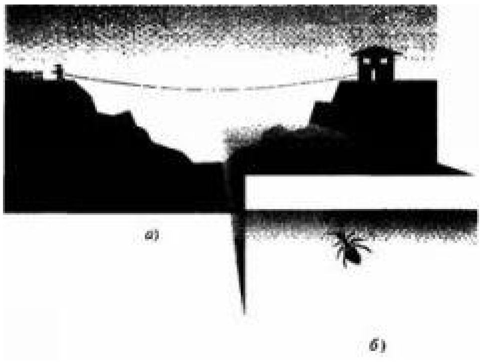

Рис. 8.1. а) Садовый шланг со значительного расстояния выглядит одномерным объектом. б) При увеличении становится видимым второе измерение – то, которое имеет форму окружности, охватывающей ось шланга.

С такого расстояния хорошо видна горизонтальная протяженность длинного развернутого шланга, однако, если только вы не обладаете орлиным зрением, вам будет трудно оценить его обхват. Наблюдая шланг с такого большого расстояния, вы можете подумать, что если бы на шланге жил муравей, у него было бы только одно измерение для прогулок: влево-вправо вдоль шланга. Если бы вас попросили указать, где этот муравей находится в какой-то момент времени, вам достаточно было бы указать только одно число: расстояние от муравья до левого (или правого) конца шланга. Основная идея этих рассуждений состоит в том, что с расстояния в километр длинный кусок Садового шланга выглядит одномерным объектом.

На самом деле известно, что у шланга есть обхват. Вам, быть может, трудно разглядеть это с расстояния в километр, но если вы вооружитесь биноклем, он увеличит изображение шланга, и вы сможете увидить это обхват непосредственно, как показано на рис. 8.1 б. Рассматривая увеличенное изображение, вы увидите, что у маленького муравья, живущего на шланге, на самом деле есть два независимых направления для прогулок. Одно из них, как вы уже заметили, проходит влево-вправо по длине шланга, а второе – это измерение «по часовой стрелке – против часовой стрелки», расположенное по окружности шланга. Теперь вы понимаете, что для того, чтобы сказать, где ваш крошечный муравей находится в заданный момент, вы должны указать два чиела: положение муравья вдоль длины шланга и его положение на окружности. Это отражает тот факт, что поверхность Садового шланга является двумерной 1).

Эти два измерения явно различаются. Направление вдоль шланга является длинным, протяженным, и хорошо видимым. Направление, опоясывающее шланг, является коротким, «свернутым» и трудноразличимым. Для того чтобы узнать о существовании циклического измерения, приходится исследовать шланг с существенно большим разрешением.

Этот пример подчеркивает неочевидную и важную особенность пространственных измерений: они могут быть двух видов. Они могут быть просторными, протяженными и, вследствие этого, доступными непосредственному наблюдению, но они также могут быть маленькими, скрученными и гораздо менее поддающимися обнаружению. Конечно, в нашем примере не пришлось тратить слишком много усилий на то, чтобы обнаружить «свернутое» измерение, опоясывающее ось шланга. Вам было достаточно воспользоваться биноклем. Однако если вам придется иметь дело с очень тонким Садовым шлангом, имеющим обхват волоса или капилляра, обнаружить свернутое измерение будет не так-то просто.

В статье, которую Калуца отправил Эйнштейну в 1919 г., он высказал удивительное предположение. Калуца утверждал, что пространственная структура Вселенной может содержать больше измерений, чем три известных нам из жизненного опыта. Как мы вскоре увидим, мотивом для столь радикальной гипотезы было то, что она позволяла построить элегантный и мощный аппарат, объединяющий общую теорию относительности Эйнштейна и теорию электромагнитного поля Максвелла в единую и однородную концептуальную систему. Но как это предложение может согласовываться с тем очевидным фактом, что мы видим в точности три пространственных измерения?

Ответ, который в неявной форме содержится в работе Калуцы, и который позднее был выражен в явном виде и уточнен шведским математиком Оскаром Клейном в 1926 г., состоит в том, что структура пространства нашей Вселенной может содержать как протяженные, так и свернутые измерения. Это значит, что в нашей Вселенной есть измерения, которые являются просторными, протяженными и легко доступными для наблюдения, подобно длине Садового шланга. Однако, подобно циклическому измерению того же шланга, Вселенная может содержать и дополнительные пространственные измерения, которые туго скручены в ничтожно малой области – столь малой, что она не может быть обнаружена даже с помощью самого современного экспериментального оборудования.

Чтобы получить более ясное представление о сути этого замечательного предложения, вернемся на минуту к примеру с Садовым шлангом. Представим себе, что на шланге черной краской нарисовано с малым шагом большое количество охватывающих его окружностей. Издалека шланг по-прежнему выглядит тонкой одномерной линией. Но, взглянув на него в бинокль, вы обнаружите свернутое измерение; после окраски найти его будет еще легче, чем раньше. Оно будет выглядеть так, как показано на рис. 8.2. Ясно видно, что поверхность шланга является двумерной, с одним крупным и протяженным измерением, а другим небольшим и имеющим форму окружности.

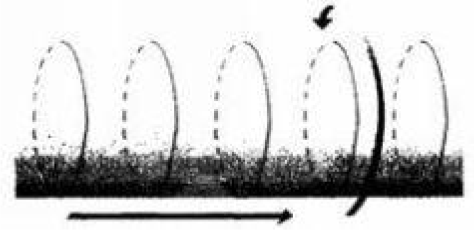

Рис. 8.2. Поверхность Садового шланга является двумерной. Одно измерение(идущее вдоль горизонтальной оси шланга), отмеченное прямой стрелкой, является длинным и протяженным. Другое измерение (окружность шланга), отмеченное круговой стрелкой, является маленьким и свернутым.

Калуца и Клейн предположили, что аналогичную структуру имеет и наша Вселенная, только в ней имеется три обычных, протяженных измерения и одно маленькое, циклическое; таким образом, общее число пространственных измерений равно четырем. Нарисовать предмет в пространстве с таким числом измерений непросто, поэтому для большей наглядности мы ограничились случаем двух протяженных и одного маленького циклического измерения. Мы изобразили это на рис. 8.3, где структура пространства последовательно увеличивается примерно так же, как в случае поверхности Садового шланга.

Самое нижнее изображение на рисунке показывает видимую структуру пространства – обычный окружающий нас мир в привычном масштабе расстояний, например, в метрах. Эти расстояния представлены самой редкой сеткой. На последующих изображениях структура пространства показана со все большим увеличением: мы фокусируем взгляд на все меньших областях, которые последовательно увеличиваем, чтобы сделать их видимыми. Сначала при переходе к меньшим расстояниям не происходит ничего особенного; на первых трех уровнях увеличения пространство сохраняет основные особенности своей структуры. Однако, по мере того как мы продолжаем наше путешествие вглубь микромира, на четвертом уровне увеличения на рис. 8.3 появляется новое, свернутое циклическое измерение, напоминающее круговые петли на ковре плотной вязки.

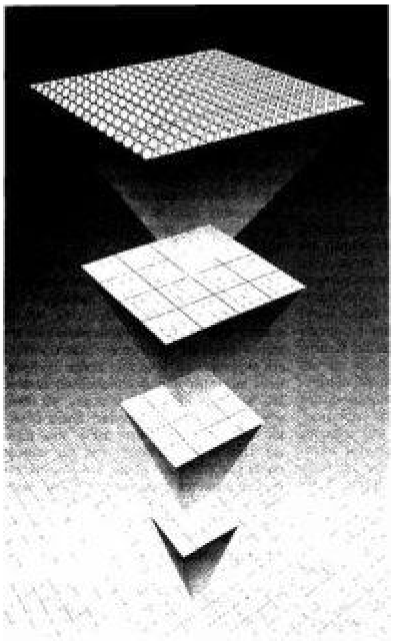

Рис. 8.3. Как и на рис. 8.1, каждый последующий уровень представляет значительное увеличение пространственной структуры, показанной на предыдущем уровне. Видно, что наша Вселенная может иметь дополнительные измерения (как это показано на четвертом уровне увеличения), коль скоро они свернуты в столь малые пространственные образования, что не поддаются прямому наблюдению.

Калуца и Клейн предположили, что дополнительное циклическое измерение существует в каждой точке пространства, определяемого протяженными измерениями, точно так же, как круговой ободок существует в каждой точке вдоль оси развернутого горизонтального шланга. (Для большей наглядности мы изобразили циклические измерения только в точках, равномерно расположенных на протяженных измерениях.) На рис. 8.4 крупным планом показана микроструктура пространства, какой ее видели Калуца и Клейн.

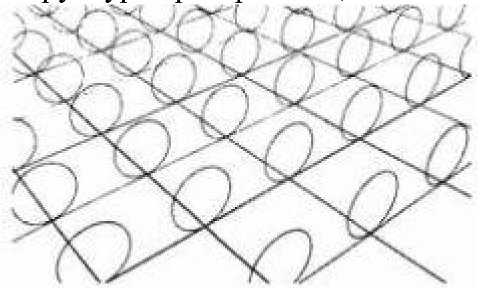

Рис. 8.4. Линии сетки соответствуют обычным протяженным измерениям; кружками показаны новые малюсенькие свернутые измерения. Подобно круговым петелькам, образующим ворс ковра, эти кружки существуют в каждой точке протяженных измерений, однако чтобы не загромождать рисунок, мы нарисовали их только в узлах сетки.

Несмотря на очевидное сходство с Садовым шлангом, есть и несколько важных различий. Вселенная имеет три протяженных пространственных измерения (мы показали только два из них) по сравнению с одним таким измерением у Садового шланга. Однако еще важнее то, что на этом рисунке мы показали пространственную структуру самой Вселенной, а не просто объекта (такого как Садовый шланг), который существует внутри Вселенной. Но основная идея остается неизменной: если дополнительные, свернутые циклические измерения нашей Вселенной, подобные круговым ободкам на Садовом шланге, являются чрезвычайно малыми, их гораздо труднее обнаружить, чем явно наблюдаемые протяженные измерения. На самом деле, если размер этих измерений достаточно мал, их невозможно обнаружить даже с помощью самых мощных инструментов. Что очень важно, циклическое измерение представляет собой не просто какое-то вздутие внутри привычных протяженных

измерений, как может показаться при взгляде на рисунок. Напротив, циклическое измерение представляет собой новое измерение, которое существует в каждой точке пространства обычных измерений, наряду с измерениями вверх-вниз, влево-вправо и вперед-назад, которые также существуют в каждой точке. Это новое и независимое направление, в котором мог бы двигаться муравей, если бы он был достаточно мал. Чтобы определить пространственное положение такого микроскопического муравья, нам потребуется указать, где он находится в обычных пространственных измерениях (представленных сеткой), а также где он расположен на циклическом измерении. Для представления информации о расположении в пространстве потребуется четыре числа; если добавить время, пространственно-временная информация потребует пяти параметров, на один больше, чем мы привыкли думать.

Итак, мы пришли к довольно удивительным выводам. Хотя мы наблюдаем только три протяженных пространственных измерения, рассуждения Калуцы и Клейна показывают, что это не исключает существования дополнительных, свернутых измерений, по крайней мере, если они достаточно малы. Вселенная вполне может иметь больше измерений, чем доступно нашему глазу.

Насколько малы должны быть эти измерения? Современная техника может обнаружить объекты, размер которых составляет одну миллиардную от одной миллиардной доли метра. Если дополнительное измерение свернуто до размера, который меньше этого значения, обнаружить его невозможно. В 1926 г. Клейн объединил первоначальное предположение Калуцы с некоторыми идеями бурно развивавшейся квантовой механики. Его расчеты показали, что дополнительное циклическое измерение по размерам сопоставимо с планковской длиной, что выходит далеко за рамки современных возможностей экспериментального изучения. С этого времени физики стали называть гипотезу о существовании дополнительных крошечных пространственных измерений теорией Калуцы-Клейна 2).

Взад и вперед по Садовому шлангу

Наглядный пример Садового шланга и иллюстрации, приведенные на рис. 8.3, призваны прояснить то, почему наша Вселенная может иметь дополнительные пространственные измерения. Но даже специалистам, ведущим исследования в этой области, трудно наглядно представить Вселенную, имеющую более трех пространственных измерений. По этой причине физики, следуя примеру Эдвина Эббота3), опубликовавшего в 1884 г. увлекательную книгу Флатляндия ставшую классикой популярного жанра, часто стремятся развить свои интуитивные представления о дополнительных измерениях, пытаясь представить, на что была бы похожа жизнь в воображаемой вселенной, имеющей меньшее число измерений, живя в которой мы постепенно осознаем, что она имеет больше измерений, чем прямо доступно нашему наблюдению. Попробуем вообразить двумерную вселенную, по форме напоминающую Садовый шланг. При этом мы должны отказаться рассматривать шланг с точки зрения «внешнего» наблюдателя как объект нашей Вселенной. Мы должны переместиться из нашего мира во вселенную Садового шланга, в которой поверхность очень длинного Садового шланга (вы можете считать его бесконечно длинным) являет собой все пространство этой вселенной. Представьте себе, что вы крошечный муравей, живущий своей жизнью на этой поверхности.

Перейдем к еще более экстремальной точке зрения. Представим, что длина циклического измерения во вселенной Садового шланга очень мала, настолько мала, что ни вы, ни ваши собратья-обитатели шланга даже не подозреваете о существовании этого измерения. Напротив, вы и все живущие во вселенной Садового шланга считаете бесспорно очевидным следующий фундаментальный факт вашей жизни – вселенная имеет одно пространственное измерение. (Если бы вселенная Садового шланга породила своего муравьиного Эйнштейна, обитатели шланга могли бы сказать, что их вселенная имеет одно

пространственное и одно временное измерение.) В действительности этот факт кажется им настолько самоочевидным, что обитатели шланга называют место, где они проживают, Линляндией подчеркивая тем самым, что оно имеет одно пространственное измерение.

Жизнь в Линляндии сильно отличается от той, к которой мы привыкли. Например, знакомые нам тела просто не могут поместиться в Линляндии. Сколько бы усилий вы ни прилагали, пытаясь изменить форму тела, вам ничего не удастся сделать с тем очевидным фактом, что у вас есть длина, ширина и высота, т. е. пространственная протяженность в трех измерениях. В Линляндии нет места для таких экстравагантных конструкций. Хотя ваш мысленный образ Линляндии может быть по-прежнему связан с длинным, похожим на нить объектом, существующим в нашем пространстве, вспомните, что вы должны думать о Линляндии как о вселенной – это и есть вселенная. Как обитатель Линляндии вы должны помещаться в ней. Попробуйте представить себе это. Даже если у вас будет тело муравья, вы не поместитесь в вашу вселенную. Вы должны сплющить ваше муравьиное тело, чтобы оно выглядело подобно телу червяка, а затем сдавливать его еще и еще, пока у него совсем не останется толщины. Чтобы жить в Линляндии, вы должны быть существом, у которого есть только длина.

Теперь представьте, что у вас есть по глазу на каждой стороне вашего тела. В отличие от глаз человека, которые могут вращаться в глазницах, чтобы иметь обзор в трех измерениях, ваши глаза, глаза линляндца, навсегда зафиксированы в одном положении, каждый из них направлен вдоль единственного измерения. Это не является анатомическим ограничением вашего нового тела. Нет, вы и все другие линляндцы понимаете, что поскольку в Линляндии только одно измерение, здесь просто нет другого направления, в котором могли бы смотреть ваши глаза. Вперед и назад – вот и все направления, которые существуют в Линляндии.

Мы можем попытаться дальше развивать наши представления о воображаемой жизни в Линляндии, но быстро осознаем, что она не слишком богата. Например, если по соседству с вами есть другой линляндец, представьте себе, как он будет выглядеть: вы увидите один его глаз, тот, который обращен к вам, но в отличие от глаза человека он будет выглядеть просто точкой. Глаза в Линляндии не имеют никаких индивидуальных особенностей и не выражают эмоций – для всего этого здесь просто нет места. Более того, вы навеки обречены видеть этот точечный глаз вашего соседа. Если вы захотите обойти его и исследовать ту часть Линляндии, которая лежит по другую сторону от его тела, вы будете очень разочарованы. Вы не сможете обойти его. Он полностью «загораживает дорогу», и в Линляндии нет места, чтобы обойти его. Последовательность расселения линляндцев после того, как они разместились по Линляндии, фиксирована и не может измениться. Такая вот тоска.

Несколько тысяч лет после пришествия бога в Линляндию, линляндец по имени Калуца К. Лин вселил некоторую надежду в сердца подавленных обитателей Линляндии. По божественному вдохновению или в полной тоске от многолетнего созерцания точечного глаза своего соседа он предположил, что Линляндия, в конце концов, может быть вовсе и не одномерной. Что, если, – теоретизировал он, – Линляндия на самом деле является двумерной, со вторым очень маленьким циклическим измерением, которое до сих пор не было открыто из-за его крошечного пространственного размера? Он продолжал рисовать картину совершенно новой жизни, которая начнется, если только удастся увеличить в размере это свернутое измерение – возможность, которую нельзя было отрицать согласно недавним работам его коллеги Линштейна. Калуца К. Лин описал вселенную, которая поразила вас и ваших сотоварищей и наполнила ваши сердца надеждой – вселенную, в которой линляндцы могут свободно обходить один другого, используя второе измерение: они перестанут быть рабами пространства. Вы поняли, что Калуца К.Лин описывает жизнь в «утолщенной» вселенной Садового шланга.

В действительности, если циклическое измерение разрастется, «раздув» Линляндию до вселенной Садового шланга, ваша жизнь изменится очень сильно. Возьмем, например, ваше тело. Поскольку вы линляндец, все, что находится между вашими глазами, составляет ваше

тело. Следовательно, ваши глаза играют такую же роль для вашего линейного тела, как кожа для обычного человеческого тела: они образуют барьер между вашим телом и окружающим его миром. Врач в Линляндии может получить доступ к внутренностям вашего линейного тела только проколов их поверхность, – другими словами, «хирургическое вмешательство» в Линляндии осуществляется через глаза.

А теперь представим, что произойдет, если Линляндия действительно имеет секретное, скрытое измерение типа предложенного Калуцей К. Лином, и это измерение развернется до размера, поддающегося непосредственному наблюдению. Теперь другой линляндец может видеть ваше тело под углом и, следовательно, непосредственно сможет увидеть его внутренность, как показано на рис. 8.5.

Рис. 8.5. Когда Линляндия расширится до размеров вселенной Садового шланга, один линляндец сможет заглянуть внутрь тела другого.

Используя это второе измерение, врачи смогут оперировать ваше тело, получая доступ непосредственно к вашим открытым внутренностям. Чудеса! Со временем, несомненно, у линляндцев разовьется покров, подобный кожному, защищающий вновь открывшиеся внутренности их тел от контакта с внешним миром. Более того, они несомненно эволюционируют в существ, имеющих не только длину, но и ширину: они станут плоскими существами, скользящими по двумерной вселенной Садового шланга, как показано на рис. 8.6.

Рис. 8.6. Плоские двумерные существа, живущие во вселенной Садового шланга.

Если циклическое измерение станет очень большим, эта двумерная вселенная начнет очень походить на Флатляндию Эббота – воображаемый двумерный мир, который Эббот наделил богатой культурой и даже кастовой системой, основанной на геометрической форме тел обитателей. Если в Линляндии трудно представить себе что-либо интересное – там просто нет места для этого, – то жизнь на Садовом шланге переполнена возможностями. Эволюция от одного к двум наблюдаемым протяженным пространственным измерениям очень радикальна.

А теперь как рефрен: почему на этом надо остановиться? Двумерная вселенная сама может иметь свернутое измерение и, следовательно, втайне от нас быть трехмерной. Мы можем проиллюстрировать это рис. 8.4, представив, что существует только два протяженных пространственных измерения (хотя при первом описании этого рисунка мы считали, что плоская сетка представляет три протяженных измерения). Если циклическое измерение развернется, двумерные существа увидят, что они оказались в совершенно ином мире, в котором движения не ограничены направлениями влево-вправо и вперед-назад. Теперь эти существа могут двигаться и в третьем измерении – в направлении «вверх-вниз» вдоль круга. На самом деле, если третье измерение станет достаточно большим, это будет наша трехмерная Вселенная. В настоящее время мы не знаем, простираются ли наши пространственные измерения до бесконечности, или они замыкаются на гигантскую окружность, недоступную в самые мощные телескопы. Если циклическое измерение на рис. 8.4 станет достаточно большим – миллиарды световых лет в поперечнике – этот рисунок вполне может быть изображением нашего мира.

И снова рефрен: почему на этом надо остановиться? Это приведет нас к представлениям Калуцы и Клейна: наша трехмерная Вселенная может иметь свернутое,

четвертое пространственное измерение, о котором никто не подозревал. Если эта поразительная возможность или ее обобщение на случай многих свернутых измерений (мы вскоре рассмотрим его) истинны, и если эти свернутые измерения раскроются до макроскопического размера, то, как показывают приведенные выше примеры с меньшим числом измерений, жизнь в том виде, в котором мы ее знаем, изменится очень сильно.

Удивительно, однако, что даже если дополнительные измерения всегда будут оставаться в свернутом состоянии и будут малы, сам факт их существования ведет к глубоким последствиям.

Объединение в высших измерениях

Хотя высказанное Калуцей в 1919 г. предположение о том, что наша Вселенная может иметь недоступные нам непосредственно пространственные измерения, замечательно само по себе, его популярность связана с иными обстоятельствами. Эйнштейн сформулировал общую теорию относительности для привычного случая Вселенной с тремя пространственными и одним временным измерением. Однако математический формализм его теории можно непосредственно обобщить и выписать аналогичные уравнения для Вселенной с дополнительными пространственными измерениями. Калуца выполнил математический анализ и в явном виде выписал новые уравнения при «умеренном» предположении об одном дополнительном пространственном измерении.

Он обнаружил, что в этой пересмотренной формулировке уравнения, относящиеся к трем обычным измерениям, по существу совпадают с уравнениями Эйнштейна. Но благодаря тому, что он включил дополнительное пространственное измерение, Калуца, как и следовало ожидать, получил новые уравнения в дополнение к тем, которые первоначально вывел Эйнштейн. Изучив эти дополнительные уравнения, связанные с новым измерением, Калуца обнаружил нечто удивительное. Оказалось, что дополнительные уравнения представляют собой не что иное, как полученные Максвеллом в 1860-х гг. уравнения, описывающие электромагнитное взаимодействие! Добавив еще одно пространственное измерение, Калуца объединил теорию гравитации Эйнштейна с максвелловской теорией электромагнитного поля.

До появления гипотезы Калуцы гравитация и электромагнетизм рассматривались как два отдельных вида взаимодействия; ничто не указывало на то, что между ними может существовать какая-либо связь. Однако, дерзнув предположить, что наша Вселенная имеет дополнительное пространственное измерение, Калуца обнаружил, что в действительности они глубоко связаны. Его теория утверждает, что и гравитация, и магнетизм связаны с волнами в структуре пространства. Гравитация переносится волнами, распространяющимися в нашем обычном трехмерном пространстве, тогда как электромагнетизм переносится волнами, использующими новое, свернутое измерение.

Калуца послал свою статью Эйнштейну. Вначале Эйнштейн ей очень заинтересовался. 21 апреля 1919 г. он написал Калуце ответное письмо, в котором говорил, что ему никогда не приходило в голову, что подобное объединение может быть достигнуто «с помощью пятимерного [четыре пространственных измерения и одно временное] цилиндрического мира». Он также писал, что «на первый взгляд ваша идея нравится мне необычайно»4). Однако спустя неделю Эйнштейн написал Калуце еще одно письмо, которое уже содержало изрядную долю скептицизма: «Я внимательно прочитал вашу статью и нахожу ее очень интересной. Я не вижу ничего, что позволило бы отрицать такую возможность. С другой стороны, я должен признать, что приведенные аргументы не выглядят достаточно убедительными»5). Спустя более чем два года, 14 октября 1921 г., когда у Эйнштейна было достаточно времени, чтобы более полно усвоить новаторский подход, предложенный Калуцей, он снова пишет ему: «Я еще раз обдумал совет воздержаться от публикации вашей идеи об объединении гравитации и электромагнетизма, который я дал вам два года назад… Если вы хотите, я бы мог

представить вашу статью в академии»6). Так, с запозданием, Калуца получил одобрение мастера.

Хотя идея была прекрасной, последующий детальный анализ гипотезы Калуцы, дополненной Клейном, показал, что она находится в серьезном противоречии с экспериментальными данными. Простейшие попытки включить в теорию электрон приводили к предсказанию отношения его массы к заряду, которое существенно отличалось от измеренных значений. Поскольку не было видно способов разрешить эту проблему, многие физики потеряли интерес к идее Калуцы. Эйнштейн и ряд других ученых продолжали исследовать возможности использования дополнительных измерений, но тем не менее это направление вскоре оказалось на периферии теоретической физики.

В действительности, идея Калуцы намного опередила свое время. 1920-е гг. ознаменовались началом бурного роста теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению основных законов микромира. Теоретики были поглощены разработкой структуры квантовой механики и квантовой теории поля. Экспериментаторы были заняты детальным изучением свойств атомов и поиском новых элементарных компонентов мироздания. Теория направляла эксперимент, а эксперимент подправлял теорию – так продолжалось около полувека, и, в конечном счете, это привело к разработке стандартной модели. Неудивительно, что в это бурное и продуктивное время предположения по поводу дополнительных измерений были на обочине исследований. В эпоху, когда физики открывали мощные методы квантовой механики, дававшие предсказания, которые могли быть проверены экспериментально, изучение возможности того, что Вселенная может иметь совершенно иные свойства на расстояниях, которые слишком малы, чтобы их можно было исследовать даже с помощью самой современной техники, вызывало мало интереса.

Но, рано или поздно, из машины выходит весь пар. К концу 1960-х – началу 1970-х гг. были разработаны теоретические основы стандартной модели. К концу 1970-х – началу 1980-х гг. многие ее предсказания получили экспериментальное подтверждение, и большинство специалистов по физике элементарных частиц пришло к выводу, что подтверждение оставшейся части этой теории является только вопросом времени. Хотя некоторые важные детали оставались невыясненными, многие думали, что на основные вопросы, касавшиеся сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, ответы уже получены.

Пришло время вернуться к величайшей проблеме: неразрешенному противоречию между общей теорией относительности и квантовой механикой. Успех в формулировке квантовых теорий трех взаимодействий, существующих в природе, вдохновил физиков на попытку разработать такую же теорию для гравитации. После того, как многочисленные гипотезы потерпели крах, сообщество физиков стало более восприимчивым к более радикальным подходам. Теория Калуцы-Клейна, оставленная умирать медленной смертью в конце 1920-х гг., была вновь воскрешена.

Современное состояние теории Калуцы-Клейна

За шесть десятилетий, прошедших с момента первого появления гипотезы Калуцы, понимание физики значительно изменилось и углубилось. Квантовая механика была полностью сформулирована и получила экспериментальное подтверждение. Были открыты и, в значительной степени, объяснены сильное и слабое взаимодействия, которые в 1920-е гг. еще не были известны. Многие физики стали считать, что первоначальное предположение Калуцы потерпело неудачу из-за того, что он не знал об этих других взаимодействиях и был поэтому слишком консервативен в пересмотре структуры пространства. Дополнительные взаимодействия требуют дополнительных измерений. Было показано, что хотя одно новое циклическое измерение и способно решить задачу объединения общей теории относительности и электромагнетизма, оно является недостаточным.

К середине 1970-х гг. развернулись интенсивные исследования, нацеленные на

разработку теорий высших размерностей со многими свернутыми измерениями. На рис. 8.7 показан пример с двумя дополнительными измерениями, свернутыми в форму мяча, т. е. сферу.

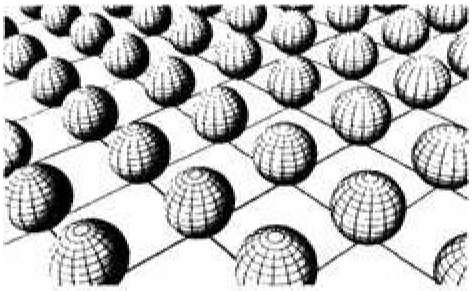

Рис. 8.7. Два дополнительных измерения, свернутые в сферу.

Как и в случае с одним циклическим измерением, эти дополнительные измерения присутствуют в каждой точке пространства, описываемого нашими обычными протяженными измерениями. (Для наглядности мы, опять же, изобразили только пример, где сферические измерения показаны в узлах регулярной сети, построенной для протяженных измерений.) Помимо предложения о другом числе дополнительных измерений, можно представить себе иные формы этих измерений. Например, на рис. 8.8 мы показали возможный вариант, в котором так же имеются два дополнительных измерения, имеющие теперь форму баранки, т.е. тора.

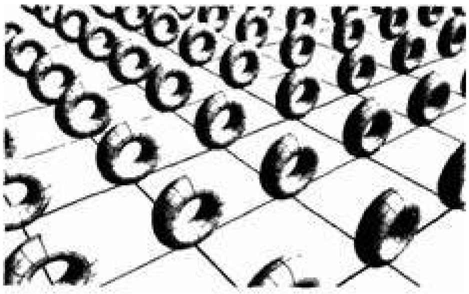

Рис. 8.8. Два дополнительных измерения, свернутые в баранку (тор).

Хотя это и выходит за пределы наших изобразительных возможностей, можно представить себе более сложные ситуации, в которых имеется три, четыре, пять и вообще произвольное число дополнительных пространственных измерений, свернутых в самые экзотические формы. Поскольку до сих пор не было получено экспериментального подтверждения существования всех этих измерений, существенным по-прежнему остается требование, чтобы их пространственный размер был меньше, чем самый малый масштаб длин, доступный современной технике.

Наиболее многообещающими из всех теорий с высшими размерностями были те, которые включали и суперсимметрию. Физики надеялись, что частичное сокращение наиболее интенсивных квантовых флуктуации, связанное с парами частиц-суперпартнеров, поможет смягчить противоречие между гравитацией и квантовой механикой. Для теорий, содержащих гравитацию, дополнительные измерения и суперсимметрию, они предложили название многомерная супергравитация.

Как и в случае с оригинальной гипотезой Калуцы, различные варианты многомерной супергравитации выглядят, на первый взгляд, многообещающе. Новые уравнения, появляющиеся в результате добавления новых измерений, поразительно напоминают уравнения, используемые для описания электромагнетизма, а также сильного и слабого взаимодействий. Однако более внимательный анализ показывает, что старые загадки никуда не исчезли. Еще более важно то, что катастрофические квантовые флуктуации пространства, возникающие на малых расстояниях, хотя и ослабляются суперсимметрией, но недостаточно для того, чтобы теория стала непротиворечивой. Физики также убедились, что трудно разработать единую, непротиворечивую теорию с высшими размерностями, объединяющую все свойства взаимодействий и материи7).

Постепенно становилось ясно, что хотя отдельные части объединенной теории

начинают занимать свои места, однако ключевое звено, способное связать их в единое целое способом, не противоречащим квантовой механике, все еще отсутствовало. В 1984 г. это недостающее звено – теория струн – ярко вышло на сцену и заняло на ней центральное место.

Дополнительные измерения и теория струн

К этому моменту вы должны были убедиться, что наша Вселенная может иметь дополнительные свернутые пространственные измерения; естественно, пока они остаются достаточно малыми, никто не сможет доказать, что они не существуют. И все же дополнительные измерения могут показаться просто трюком. Наша неспособность исследовать расстояния, меньшие одной миллиардной от одной миллиардной доли метра, допускает существование не только сверхмалых измерений, но и различных других фантастических возможностей, даже существование микроскопических цивилизаций, населенных крошечными зелеными человечками. Хотя первое выглядит гораздо более рационально, чем последнее, постулирование любой из этих непроверенных и, в настоящее время, непроверяемых экспериментально возможностей может выглядеть одинаково произвольным.

Таким было положение дел до появления теории струн. Эта теория разрешает центральное противоречие современной физики – несовместимость квантовой механики и общей теории относительности и унифицирует наше понимание всех фундаментальных компонент вещества и взаимодействий, существующих в природе. В дополнение к этим достижениям выясняется, что теория струн требует, чтобы Вселенная имела дополнительные измерения.

Вот почему это так. Один из главных выводов квантовой механики состоит в том, что наша предсказательная способность принципиально ограничена утверждениями, что такой-то результат имеет такую-то вероятность. Хотя Эйнштейн испытывал неприязнь к современному пониманию квантовой теории (и вы можете согласиться с ним), факт остается фактом. Давайте принимать его таким, каков он есть. Как всем известно, значения вероятности всегда находятся между 0 и 1, или, если пользоваться процентами, между 0 и 100%. Как установили физики, первым признаком того, что квантовая механика перестает работать, является возникновение в расчетах «вероятностей», которые выходят за эти пределы. Например, как мы упоминали выше, признаком серьезного противоречия между общей теорией относительности и квантовой механикой в модели с точечными частицами являются бесконечные значения вероятностей, получаемые при расчетах. Как уже обсуждалось, теория струн позволяет избавиться от этих бесконечностей. Однако мы еще не сказали, что осталась другая, более тонкая проблема. На начальном этапе развития теории струн физики обнаружили, что некоторые вычисления приводят к появлению отрицательных вероятностей, также находящихся вне области допустимых значений. Таким образом, на первый взгляд, теория струн утонула в своем собственном квантово-механическом бульоне.

С непоколебимым упорством физики искали и нашли причину появления этих неприемлемых результатов. Начнем объяснение с простого наблюдения. Если мы положим струну на двумерную поверхность (такую, как поверхность стола или Садового шланга), то число независимых направлений, в которых может колебаться струна, уменьшится до двух: влево-вправо и вперед-назад вдоль поверхности. Любая мода колебаний, ограниченная такой поверхностью, будет представлять собой комбинацию колебаний в этих двух направлениях. Одновременно это означает, что струна во Флатляндии, во вселенной Садового шланга или в любой другой двумерной вселенной тоже сможет колебаться только в этих двух независимых пространственных направлениях. Однако если мы уберем струну с поверхности, то число независимых направлений колебаний увеличится до трех, поскольку струна теперь сможет колебаться и в направлении вверх-вниз. Это означает, что во вселенной с тремя пространственными измерениями струна также может колебаться в трех

независимых направлениях. Дальнейшее развитие этой идеи труднее поддается представлению, но общая схема сохраняется: во вселенных с большим числом пространственных измерений будет больше независимых направлений, в которых могут совершаться колебания.

Мы уделили такое внимание этому факту, относящемуся к колебаниям струн, потому что физики обнаружили: вычисления, дающие бессмысленные результаты, очень чувствительны к числу независимых направлений, в которых может колебаться струна. Отрицательные вероятности возникают из-за несоответствия между требованиями теории и тем, что, как кажется, диктует реальность: расчеты показали, что если бы струны могли колебаться в девяти независимых пространственных направлениях, все отрицательные вероятности исчезли бы. Ну что ж, это большая победа теории, но нам-то какое дело до этого? Если теория струн призвана описать наш мир с тремя пространственными измерениями, у нас по-прежнему остаются проблемы.

Но остаются ли? Вспоминая об идее более чем полувековой давности, мы видим, что Калуца и Клейн оставили нам лазейку. Поскольку струны так малы, они могут колебаться не только в больших, протяженных измерениях, но и в крошечных свернутых. Таким образом, мы можем удовлетворить требованию о девяти пространственных измерениях, предъявленному к нашей Вселенной теорией струн, предположив в духе Калуцы и Клейна, что в дополнение к трем привычным, протяженным пространственным измерениям Вселенная имеет шесть свернутых. В результате теория струн, которая была на грани исключения из мира физических реальностей, будет спасена. Более того, вместо постулирования существования дополнительных измерений, как делали Калуца, Клейн и их последователи, теория струн требует их. Для того чтобы теория струн стала непротиворечивой, Вселенная должна иметь девять пространственных измерений и одно временное – итого всего десять. Таким образом, идея Калуцы, прозвучавшая в 1919 г., торжественно и убедительно вышла на сцену.

Некоторые вопросы

Однако сразу же возникает ряд вопросов. Во-первых, почему теория струн требует именно девяти пространственных измерений для того, чтобы избежать бессмысленных значений вероятности? Это тот вопрос, на который, вероятно, труднее всего ответить без привлечения математического формализма теории струн. Прямой расчет с использованием аппарата теории струн приводит к этому результату, но никто не может дать интуитивного, не загроможденного техническими деталями объяснения, почему так происходит. Эрнест Резерфорд однажды сказал, что в действительности, если вы не можете объяснить результат на простом, не отягощенном специальными терминами языке, это значит, что вы не понимаете его по-настоящему. Слова Резерфорда не говорят, что ваш результат неверен, они говорят, что вы не полностью понимаете его происхождение, значение или следствия. Наверное, это справедливо по отношению к дополнительным измерениям в теории струн. (Воспользуемся возможностью упомянуть в скобках о центральном положении второй революции в теории суперструн, которую мы будем обсуждать в главе 12. Расчеты, лежащие в основе заключения о том, что имеется десять пространственно-временных измерений – девять пространственных и одно временное, оказались приближенными. В середине 1990-х гг. Виттен, основываясь на своих догадках и на более ранних работах Майкла Даффа из Техасского университета, а также Криса Халла и Пола Таунсенда из Кембриджского университета, смог привести убедительные свидетельства того, что в приближенных расчетах на самом деле было пропущено одно пространственное измерение. Теория струн, как он показал к большому удивлению большинства специалистов, работающих в этой области, на самом деле требует десяти пространственных измерений и одного временного, – т. е. в сумме одиннадцати измерений. Вплоть до главы 12 мы будем игнорировать этот важный результат, поскольку он не имеет прямого отношения к вопросам, которые мы

собираемся рассматривать.)

Во-вторых, если уравнения теории струн (или, точнее, приближенные уравнения, которые мы будем обсуждать до главы 12) показывают, что Вселенная имеет девять пространственных измерений и одно временное, почему три пространственных измерения (и одно временное) являются развернутыми и протяженными, а все остальные – маленькими и свернутыми? Почему все они не являются развернутыми, или почему все они не являются свернутыми, почему не реализовался какой-то другой промежуточный вариант? В настоящее время никто не знает ответа на этот вопрос. Если теория струн верна, рано или поздно мы узнаем ответ, но пока наше понимание этой теории не позволяет его получить. Сказанное не значит, что никто не отваживался ответить на этот вопрос. Например, встав на точку зрения космологии, можно предположить, что вначале все измерения находились в туго свернутом состоянии, а затем, в ходе Большого взрыва, три пространственных измерения и одно временное развернулись до своего современного состояния, тогда как остальные пространственные измерения остались малыми. Предварительные соображения о том, почему развернулись только три пространственных измерения, будут рассмотрены в главе 14, но, честно говоря, они пока находятся в стадии разработки. Ниже мы будем предполагать, что все пространственные измерения, кроме трех, находятся в свернутом состоянии, в соответствии с тем, что мы наблюдаем в окружающем мире. Одна из основных задач современного этапа исследований состоит в том, чтобы показать, что это предположение следует из самой теории.

В-третьих, если требуется несколько дополнительных измерений, не может ли быть так, что наряду с пространственными будут и дополнительные временные измерения? Если вы поразмышляете об этом с минуту, то почувствуете, что это поистине странная возможность. У нас есть внутреннее интуитивное представление о том, как выглядит вселенная, имеющая несколько пространственных измерений, поскольку мы живем в мире, в котором постоянно сталкиваемся с несколькими, а именно с тремя измерениями. Но как выглядит вселенная, в которой есть несколько времен? Будет ли одно из них совпадать с тем, к которому мы привыкли, а другие будут чем-то «иным»?

Ситуация станет еще более загадочной, если вы подумаете о свернутых временных измерениях. Например, если крошечный муравей перемещается вдоль дополнительного пространственного измерения, свернутого наподобие круга, то, завершив очередной круг, он будет снова и снова оказываться в одном и том же месте. В этом мало удивительного, поскольку мы привыкли, что можем, если захотим, возвращаться в одно и то же место в пространстве столько раз, сколько нам нужно. Но если свернутое измерение является временным, перемещение вдоль него будет означать, что спустя какой-то промежуток мы будем оказываться в предыдущем моменте времени. Это, конечно, далеко выходит за пределы нашего повседневного опыта. Время в привычном для нас понимании – это измерение, в котором мы можем двигаться только в одном направлении с абсолютной неизбежностью. Мы никогда не можем вернуться в то мгновение, которое уже прошло. Конечно, свернутые временные измерения могут иметь характеристики, отличающиеся от тех, которые свойственны нашему обычному времени, простирающемуся из прошлого, с момента рождения Вселенной, к настоящему периоду. Однако в противоположность дополнительным пространственным измерениям, эти новые и доселе неизвестные временные измерения, очевидно, могут потребовать более значительной перестройки нашей интуиции. Некоторые теоретики исследуют возможность включения в теорию струн дополнительных временных измерений, но на сегодняшний день ситуация еще далека от определенности. В нашем обсуждении теории струн мы будем придерживаться более «традиционного» подхода, в котором все свернутые измерения являются пространственными. Тем не менее, в будущем интригующая возможность новых временных измерений вполне может сыграть свою роль.

Физические следствия дополнительных измерений

Годы исследований, отсчет которых идет с первой статьи Калуцы, показали, что хотя размеры всех дополнительных измерений, предлагаемых физиками, должны быть слишком малы, чтобы мы могли наблюдать их непосредственно или с помощью имеющегося оборудования, эти измерения оказывают важное косвенное влияние на наблюдаемые физические явления. В теории струн эта связь между свойствами пространства на микроскопическом уровне и наблюдаемыми физическими явлениями видна особенно отчетливо.

Чтобы понять это, вспомним, что массы и заряды частиц определяются возможными модами резонансных колебаний струн. Представьте себе крошечную струну, которая движется и колеблется, и вы поймете, что моды резонансных колебаний подвержены влиянию со стороны окружающего пространства. Подумайте, например, о морских волнах. На бескрайних просторах океана отдельная изолированная волна может иметь любую форму и двигаться в любом направлении. Это очень похоже на колебания струны, движущейся по развернутым протяженным пространственным измерениям. Как указывалось в главе 6, такая струна в любой момент времени может колебаться в любом из протяженных измерений. Но когда морская волна проходит через более узкий участок, на форму волны будут влиять, например, глубина моря, расположение и форма скал, форма канала, по которому движется вода и т. п. Можно также представить себе органную трубу или валторну. Звук, который может воспроизводить каждый из этих инструментов, непосредственно зависит от резонансной моды колебаний воздуха, проходящего через них, а эта мода определяется формой и размерами каналов в инструменте, через которые движется поток воздуха. Свернутые пространственные измерения оказывают аналогичное влияние на возможные моды резонансных колебаний струны. Поскольку крошечные струны колеблются во всех пространственных измерениях, форма, в которую свернуты эти дополнительные пространственные измерения, а также форма их взаимного переплетения, сильно влияют и строго ограничивают возможные моды резонансных колебаний. Эти моды, в значительной степени определяемые геометрией дополнительных измерений, формируют набор свойств возможных частиц, наблюдаемых в привычных протяженных измерениях. Это означает, что геометрия дополнительных измерений определяет фундаментальные физические свойства, такие как массы частиц и заряды, которые мы наблюдаем в нашем обычном трехмерном пространстве.

Это столь глубокий и важный момент, что мы повторим его еще раз. Согласно теории струн Вселенная состоит из крошечных струн. Моды резонансных колебаний этих струн определяют, на уровне микромира, массы и константы взаимодействия элементарных частиц. Теория струн также требует существования дополнительных измерений, которые должны быть свернуты до очень маленького размера, чтобы не было противоречия с тем фактом, что исследователям до сих пор не удалось их обнаружить. Но крошечные струны могут двигаться в крошечных пространствах. Когда струна перемещается, осциллируя по ходу своего движения, геометрическая форма дополнительных измерений играет решающую роль, определяя моды резонансных колебаний. Поскольку моды резонансных колебаний струн проявляются в виде масс и зарядов элементарных частиц, мы имеет право утверждать, что эти фундаментальные свойства Вселенной в значительной степени определяются размерами и формой дополнительных измерений. Этот результат представляет собой одно из наиболее глубоких следствий теории струн.

Поскольку дополнительные измерения оказывают столь глубокое влияние на фундаментальные физические свойства Вселенной, мы должны с неослабевающей энергией исследовать, как выглядят эти свернутые измерения.

Как выглядят свернутые измерения?

Дополнительные пространственные измерения теории струн не могут быть свернуты произвольным образом: уравнения, следующие из теории струн, существенно ограничивает

геометрическую форму, которую они могут принимать. В 1984 г. Филипп Канделас из университета штата Техас в г. Остине, Гари Горовиц и Эндрю Строминджер из университета штата Калифорния в г. Санта-Барбара, а также Эдвард Виттен показали, что этим условиям удовлетворяет один конкретный класс шестимерных геометрических объектов. Они носят название пространств Калаби-Яу (или многообразий Калаби-Яу), в честь двух математиков, Эудженио Калаби из университета штата Пенсильвания и Шин-Туна Яу из Гарвардского университета, исследования которых в близкой области, выполненные еще до появления теории струн, сыграли центральную роль в понимании этих пространств. Хотя математическое описание пространств Калаби-Яу является довольно сложным и изощренным, мы можем получить представление о том, как они выглядят, взглянув на рисунок8).

Пример пространства Калаби-Яу показан на рис. 8.99). Когда вы будете рассматривать этот рисунок, вы должны помнить, что ему присущи некоторые ограничения. Мы попытались представить шестимерное пространство на двумерном листе бумаги, что неизбежно привело к довольно существенным искажениям. Тем не менее, рисунок передает основные черты внешнего вида пространств Калаби-Яу10). На рис.8.9

Рис. 8.9. Пример пространства Калаби-Яу.

иллюстрируется всего лишь один из многих десятков тысяч возможных видов пространств Калаби-Яу, которые удовлетворяют строгим требованиям к дополнительным измерениям, вытекающим из теории струн. Хотя принадлежность к клубу, в который входят десятки тысяч членов, нельзя считать эксклюзивной особенностью, вы можете сравнить это число с бесконечным числом форм, которые возможны с чисто математической точки зрения; в этом смысле пространства Калаби-Яу действительно являются достаточно редкими.

Чтобы получить общую картину, вы должны теперь мысленно заменить каждую из сфер, показанных на рис. 8.7 и представляющих два свернутых измерения, пространством Калаби-Яу. Иначе говоря, как показано на рис. 8.10, в каждой точке нашего привычного трехмерного пространства согласно теории струн имеется шесть доселе неведомых измерений, тесно свернутых в одну из этих довольно причудливых форм.

Рис. 8.10. Согласно теории струн Вселенная имеет дополнительные измерения, свернутые в пространство Калаби-Яу.

Эти измерения представляют собой неотъемлемую и вездесущую часть структуры пространства, они присутствуют повсюду. Например, если вы опишете рукой широкую дугу, ваша рука будет двигаться не только в трех развернутых измерениях, но и в этих свернутых. Конечно, поскольку эти свернутые измерения столь малы, ваша рука в своем движении пересечет их бесчисленное количество раз, снова и снова возвращаясь к исходной точке.

Размеры этих измерений настолько малы, что в них не слишком много места для перемещения таких огромных объектов, как ваша рука, и все они «размазываются»: закончив движение руки, вы остаетесь в полном неведении о путешествии, которое она совершила сквозь свернутые измерения Калаби-Яу.

Это поразительная особенность теории струн. Но если у вас практичный ум, вы обязаны вернуться к обсуждению существенных и конкретных вопросов. Теперь, когда мы лучше понимаем, как выглядят дополнительные измерения, мы можем задать вопрос, какие физические свойства обязаны своим происхождением струнам, колеблющимся в этих измерениях, и как сравнить эти свойства с результатами экспериментальных наблюдений? В викторине под названием «теория струн» это вопрос на миллион долларов.

Глава 9. Дымящееся ружье: экспериментальные свидетельства

Ничто не доставило бы специалисту по теории струн большего удовольствия, чем возможность гордо предъявить миру подробный список предсказаний, поддающихся экспериментальной проверке. Действительно, не существует способа убедиться, что та или иная теория действительно описывает наш мир, не подвергнув ее предсказания экспериментальной проверке. И неважно, какие восхитительные картины рисует теория струн – если она не описывает с хорошей точностью нашу Вселенную, она имеет не больше отношения к делу, чем навороченная компьютерная игра Драконы и темницы. Эдвард Виттен с гордостью объявил, что теория струн уже сделала впечатляющее и подтвержденное экспериментально предсказание: «Теория струн обладает замечательным свойством: она предсказывает гравитацию» 1). Этим Виттен хотел сказать, что Ньютон и Эйнштейн разработали свои теории гравитации, так как наблюдения ясно показывали им, что гравитация существует и поэтому требует точного и непротиворечивого объяснения. Напротив, даже если бы физики, занимающиеся изучением теории струн, совершенно ничего не знали об общей теории относительности, они неизбежно пришли бы к ней в рамках теории струн. Благодаря существованию моды колебаний, соответствующей безмассовому гравитону со спином 2, гравитация является неотъемлемым элементом этой теории. Как сказал Виттен: «Тот факт, что гравитация является следствием теории струн, является величайшим теоретическим достижением в истории»2). Признавая, что «предсказание» правильнее было бы называть «послесказанием», так как физики дали теоретическое описание гравитации до появления теории струн, Виттен подчеркивает, что это просто историческая случайность. Какая-нибудь другая высокоразвитая цивилизация во Вселенной, фантазирует Виттен, вполне могла бы сначала открыть теорию струн, а уже после, в качестве ошеломляющего следствия, – теорию гравитации.

Однако, поскольку историю науки на нашей планете уже не перепишешь, многие считают сделанное задним числом предсказание гравитации неубедительным экспериментальным подтверждением теории струн. Большинство физиков в гораздо большей степени было бы удовлетворено одним из двух: либо чтобы теория струн дала обычное предсказание, поддающееся экспериментальной проверке, либо чтобы она дала истолкование каким-либо физическим свойствам (таким, как масса электрона или существование трех семейств элементарных частиц), для которых в настоящее время не существует объяснения. В этой главе мы расскажем, насколько далеко ученые, работающие в области теории струн, продвинулись в этом направлении.

Ирония судьбы состоит в том, что хотя потенциально теория струн обещает стать по предсказательной силе наиболее мощной из всех теорий, с которыми когда-либо имели дело ученые, способной объяснить наиболее фундаментальные свойства природы, физики до сих пор не могут делать предсказания с точностью, достаточной для сопоставления с экспериментальными данными. Представьте себе ребенка, который получил на Новый год игрушку, о которой давно мечтал, но не может ее включить, потому что в инструкции не хватает нескольких страниц. Так и современные физики, владея тем, что вполне может

оказаться святым Граалем современной науки, не могут воспользоваться всей мощью этого средства, пока не напишут полное «руководство пользователя». Тем не менее, мы увидим в этой главе, что при небольшом везении одно центральное свойство теории струн может получить экспериментальное подтверждение уже в ближайшем десятилетии. А при большей удаче косвенные подтверждения могут быть получены в любой момент.

Перекрестный огонь критики

Истинна ли теория струн? Мы не знаем этого. Если вы разделяете веру в то, что законы физики не должны делиться на законы, управляющие макромиром, и законы, диктующие правила для микромира, а также верите, что мы не должны останавливаться, пока у нас не будет теории с неограниченной областью применимости, тогда теория струн – ваша единственная надежда. Конечно, вы можете возразить, что такое утверждение свидетельствует скорее о недостатке воображения у физиков, чем о какой-то уникальности теории струн. Возможно. Вы можете также сказать, что подобно человеку, который ищет потерянные ключи под уличным фонарем, физики столпились вокруг теории струн просто потому, что по какому-то капризу в развитии науки в этом направлении упал случайный луч прозрения. Может быть. В конце концов, если вы по натуре консерватор или любите спор ради спора, вы даже можете сказать, что физики напрасно тратят время на теорию, которая постулирует новые свойства природы в масштабе, в несколько сот миллионов миллиардов раз меньшем того, который доступен экспериментальному исследованию.

Если бы вы высказали эти упреки в середине 1980-х гг., когда возник первый всплеск интереса к теории струн, вы оказались бы в одной компании со многими самыми именитыми физиками того времени. Например, нобелевский лауреат Шелдон Глэшоу, работавший в Гарвардском университете, вместе с другим физиком Полом Гинспаргом, в то время также сотрудником Гарварда, публично обвинили теорию струн в невозможности экспериментальной проверки: «Вместо традиционного соревнования теории и эксперимента, специалисты по теории суперструн заняты поисками внутренней гармонии там, где критерием истинности являются элегантность, уникальность и красота. Само существование теории держится на магических совпадениях, чудесных сокращениях и связях между казавшихся несвязанными (и, возможно, еще и не открытыми) областями математики. Достаточно ли этих свойств, чтобы поверить в реальность суперструн? Могут ли математика и эстетика заменить и превзойти обычный эксперимент?»3)

В другом своем выступлении Глэшоу продолжил эту тему, сказав, что «…теория струн столь амбициозна, что она может быть либо целиком истинна, либо целиком ложна. Единственная проблема состоит в том, что ее математика настолько нова и сложна, что неизвестно, сколько десятилетий потребуется на ее окончательную разработку»4'.

Он даже задавался вопросом, должны ли специалисты по теории струн «получать зарплату от физических факультетов, и позволительно ли им совращать умы впечатлительных студентов», предупреждая, что теория струн подрывает основы науки, во многом так, как это делала теология в средние века5'.

Ричард Фейнман незадолго до своей смерти дал ясно понять, что он не верит в то, что теория струн является единственным средством для решения проблем, в частности, катастрофических бесконечностей, препятствующих гармоничному объединению гравитации и квантовой механики: «По моим ощущениям – хотя я могу и ошибаться – существует не один способ решения этой задачи. Я не думаю, что есть только один способ, которым мы можем избавиться от бесконечностей. Тот факт, что теория позволяет избавиться от бесконечностей, не является для меня достаточным основанием, чтобы поверить в ее уникальность»6'.

И Говард Джорджи, знаменитый коллега и сотрудник Глэшоу по Гарварду, в конце 1980-х гг. также был среди громогласных критиков теории струн: «Если мы позволим увлечь себя сладкоголосым сиренам. вешающим об „окончательном" объединении на расстояниях

столь малых, что наши друзья-экспериментаторы не смогут помочь нам, мы попадем в беду, поскольку лишимся ключевого процесса отметания ошибочных идей, который выгодно отличает физику от многих других менее интересных видов человеческой деятельности»7).

Как и во многих других делах большой важности, на каждого скептика приходится энтузиаст. Виттен говорил, что когда он познакомился с тем, как теория струн объединяет гравитацию и квантовую механику, это стало «величайшим интеллектуальным потрясением» в его жизни8). Кумрун Вафа, ведущий специалист по теории струн из Гарвардского университета, утверждал, что «теория струн, несомненно, дает глубочайшее понимание мироздания, которого мы когда-либо достигали»9). А нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн сказал, что теория струн – «фантастическая вещь», и что он полагает, что один из вариантов этой теории однажды станет теорией всего мироздания10).

Итак, как вы могли видеть, дебаты подогревались отчасти физикой, а отчасти философскими рассуждениями о том, какой должна быть физика. «Традиционалисты» желали, чтобы теоретические работы имели тесную связь с экспериментальными наблюдениями, в духе успешной научной деятельности в течение нескольких последних столетий. Другие считали, что нам по силам взяться за проблемы, экспериментальное изучение которых находится за пределами современных технических возможностей.

Несмотря на различия в философских подходах, волна критики теории струн за последнее десятилетие существенно пошла на убыль. Глэшоу связывает это с двумя моментами. Во-первых, он заметил, что в середине 1980-х гг. «специалисты по теории струн с энтузиазмом и бьющим через край оптимизмом объявляли, что они вот-вот ответят на все вопросы физики. Сейчас, когда они стали более благоразумными, многие мои критические замечания середины 1980-х гг. потеряли свою актуальность»11).

Во-вторых, он также указал, что «мы, исследователи, работы которых не связаны с теорией струн, не добились сколько-нибудь существенного прогресса за последнее десятилетие. Поэтому аргумент, что теория струн является единственным игроком на этом поле, имеет под собой очень серьезное основание. Есть вопросы, на которые в рамках традиционной квантовой теории поля нельзя получить ответы. Это должно быть ясно. Ответы на них может дать кто-то другой, и единственный „другой", которого я знаю – это теория струн»12'.

Джорджи вспоминал свои высказывания середины 1980-х гг. примерно в том же духе: «В разные времена на начальных этапах своего развития теория струн получала завышенные оценки. В последующие годы я обнаружил, что некоторые идеи теории струн ведут к интересным выводам, которые оказались полезны в моих собственных исследованиях. Теперь я с большей радостью наблюдаю, как люди посвящают свое время исследованиям в теории струн, поскольку вижу, что она способна дать нечто полезное»13).

Теоретик Дэвид Гросс, входящий в число лидеров как в традиционной физике, так и в теории струн, красноречиво подытожил ситуацию: «Обычно, когда мы карабкались на гору природы, прокладыванием пути занимались экспериментаторы. Мы, ленивые теоретики, плелись где-то сзади. Время от времени они сбрасывали вниз экспериментальный камень, который рикошетил от наших голов. Со временем мы находили объяснение и могли продолжать наш путь, который нам перекрыли экспериментаторы. Догнав наших друзей, мы объясняли им, с чем они столкнулись, и как они туда попали. Таков был старый и легкий (по крайней мере, для теоретиков) способ восхождения на горы. Нам всем хотелось бы, чтобы эти дни снова вернулись. Но теперь мы, теоретики, должны возглавить колонну. Это будет гораздо более одинокий путь»14).

Теоретики, занимающиеся струнами, не хотят совершать одиночное восхождение на самые высокие вершины природы; они предпочли бы разделить трудности и радости со своими коллегами-экспериментаторами. Сегодняшняя ситуация вызвана отставанием технологии, историческим разрывом: теоретические канаты и крючья для последнего штурма вершины готовы (по крайней мере, частично), а экспериментальные еще не существуют. Но это вовсе не означает, что теория струн окончательно рассталась с

экспериментом. Напротив, теоретики полны надежд «спихнуть вниз теоретический камень» с вершин ультравысокой энергии на головы экспериментаторов, работающих в базовом лагере. Это основная цель современных исследований в теории струн. Пока не удалось оторвать камня от вершины, чтобы запустить его вниз, но, как мы увидим ниже, несколько дразнящих и многообещающих камешков определенно удалось найти.

Дорога к эксперименту

Без радикальных прорывов в технологии мы никогда не сможем получить доступ к ультрамикроскопическому масштабу расстояний, необходимому для прямого наблюдения струн. На ускорителе размером несколько километров физики могут проводить исследования на расстояниях порядка одной миллиардной от одной миллиардной доли метра. Изучение меньших расстояний требует более высоких энергий и, следовательно, более крупных ускорителей, способных сфокусировать достаточное количество энергии на отдельных частицах. Поскольку планковская длина примерно на 17 порядков меньше, чем длины, которые мы можем исследовать сегодня, для того чтобы увидеть струну при использовании современных технологий, нам потребуется ускоритель размером с галактику. На самом деле Шмуль Нусинов из Тель-Авивского университета показал, что эта оценка основана на линейной экстраполяции и, по-видимому, является слишком оптимистичной; проведенный им детальный анализ показал, что потребуется ускоритель размером со всю Вселенную. (Энергия, необходимая для исследования вещества на планковских масштабах, равна примерно тысяче киловатт-часов – ее хватило бы для работы среднего кондиционера в течение тысячи часов – и не представляет из себя чего-либо особо выдающегося. Кажущаяся неразрешимой техническая проблема состоит в том, чтобы сконцентрировать всю эту энергию в отдельной частице, т. е. на отдельной струне.) После того, как конгресс США в конечном счете прекратил финансирование сверхпроводящего суперколлайдера – ускорителя с длиной окружности «всего» 87 км, вряд ли стоит ожидать, что кто-то даст деньги на строительство ускорителя для проведения исследований на планковских масштабах. Если мы собираемся проверить теорию струн экспериментально, мы должны найти косвенный метод. Мы должны определить физические следствия теории струн, которые могут наблюдаться на больших расстояниях, значительно превосходящих размер самих струн15). В своей основополагающей статье Канделас, Горовиц, Строминджер и Виттен сделали первые шаги в этом направлении. Они не только установили, что дополнительные измерения в теории струн должны быть свернуты в многообразие Калаби-Яу, но также определили следствия, которые имеет этот факт для возможных мод колебаний струн. Один из основных результатов, полученных ими, проливает свет на совершенно неожиданные решения, которые теория струн дает старым проблемам физики элементарных частиц.

Вспомним, что открытые физиками элементарные частицы разделяются на три семейства с идентичной организацией, при этом частицы каждого следующего семейства имеют все большую массу. Вопрос, на который до появления теории струн не было ответа, звучит так: «С чем связано существование семейств и почему семейств три?» Вот как отвечает на него теория струн. Типичное многообразие Калаби-Яу содержит отверстия, похожие на те, которые имеются в центре граммофонной пластинки, баранке или многомерной баранке, показанной на рис. 9.1. На самом деле, в многомерных пространствах Калаби-Яу могут иметься отверстия самых различных типов, в том числе отверстия в нескольких измерениях («многомерные отверстия»), но основную идею можно видеть и на рис. 9.1.

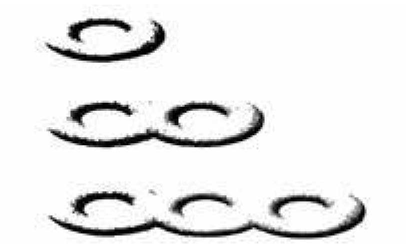

Рис. 9.1. Баранка (или тор) и ее кузены – торы с ручками.

Канделас, Горовиц, Строминджер и Виттен провели тщательное исследование влияния этих отверстий на возможные моды колебаний струн, и вот что они установили. С каждым отверстием в многообразии Калаби-Яу связано семейство колебаний с минимальной энергией. Поскольку обычные элементарные частицы должны соответствовать модам колебаний с минимальной энергией, существование нескольких отверстий, похожих на отверстия в многомерной баранке, означает, что моды колебаний струн распадаются на несколько семейств. Если свернутое многообразие Калаби-Яу имеет три отверстия, мы обнаружим три семейства элементарных частиц16). Таким образом, теория струн провозглашает, что наблюдаемое экспериментально разделение на семейства не является необъяснимой особенностью, имеющей случайное или божественное происхождение, а объясняется числом отверстий в геометрической форме, которую образуют дополнительные измерения! Такие результаты заставляют сердца физиков биться учащенно.

Вам может показаться, что число отверстий в свернутых измерениях планковских размеров – результат, стоящий поистине на вершине скалы современной физики, – может теперь столкнуть пробный камень эксперимента вниз, в направлении доступных нам сегодня энергий. В конце концов, экспериментаторы могут определить (на самом деле, уже определили) число семейств частиц: три. К несчастью, число отверстий в каждом из десятков тысяч известных многообразий Калаби-Яу изменяется в широких пределах. Некоторые имеют три отверстия. Но другие имеют четыре, пять, двадцать пять и т. д. – у некоторых число отверстий достигает даже 480. Проблема состоит в том, что в настоящее время никто не знает, как определить из уравнений теории струн, какое из многообразий Калаби-Яу определяет вид дополнительных пространственных измерений. Если бы мы смогли найти принцип, который позволяет выбрать одно из многообразий Калаби– Яу из огромного числа возможных вариантов, тогда, действительно, камень с вершины загромыхал бы по склону в сторону лагеря экспериментаторов. Если бы конкретное пространство Калаби-Яу, выделяемое уравнениями теории, имело три отверстия, мы бы получили от теории струн впечатляющее «послесказание», объясняющее известную особенность нашего мира, которая в ином случае выглядит совершенно мистической. Однако поиск принципа выбора многообразия Калаби-Яу пока остается нерешенной проблемой. Тем не менее, и это важно, мы видим, что теория струн способна в принципе дать ответ на эту загадку физики элементарных частиц, что само по себе уже представляет значительный прогресс.

Число семейств частиц представляет собой лишь одно из экспериментальных следствий, вытекающих из геометрической формы дополнительных измерений. Благодаря влиянию на возможные моды колебаний струн, дополнительные размерности оказывают влияние на детальные свойства частиц-переносчиков взаимодействия и частиц вещества. Еще один важный пример, продемонстрированный в работе Строминджера и Виттена, состоит в том, что массы частиц в каждом семействе зависят от того – будьте внимательны, это тонкий момент, – как пересекаются и накладываются друг на друга границы различных многомерных отверстий в многообразии Калаби-Яу. Это явление с трудом поддается визуализации, но основная идея состоит в том, что когда струны колеблются в дополнительных свернутых измерениях, расположение отверстий и то, как многообразие Калаби-Яу обворачивается вокруг них, оказывает прямое воздействие на возможные моды резонансных колебаний. Детали этого явления довольно сложны и, на самом деле, не столь существенны; важно то, что как и в случае с числом семейств, теория струн дает основу для ответа на вопросы, по которым предыдущие теории хранили полное молчание, например,

почему электрон и другие частицы имеют те массы, которые они имеют. Однако эти вопросы также требуют знания того, какой вид имеют дополнительные измерения, свернутые в пространства Калаби-Яу.

Сказанное выше дало некоторое представление о том, каким образом теория струн может однажды объяснить приведенные в табл. 1.1 свойства частиц вещества. Физики, работающие в теории струн, верят, что таким же образом смогут однажды объяснить и свойства перечисленных в табл. 1.2 частиц, переносящих фундаментальные взаимодействия. Когда струны закручиваются и вибрируют в развернутых и свернутых измерениях, небольшая часть их обширного спектра колебаний представлена модами, соответствующими спину I или 2. Эти моды являются кандидатами на роль фундаментальных взаимодействий. Независимо от конфигурации пространства Калаби-Яу, всегда имеется одна безмассовая мода колебаний, имеющая спин 2; мы идентифицируем эту моду как гравитон. Однако точный список частиц-переносчиков взаимодействия, имеющих спин 1, – их число, интенсивность взаимодействия, которое они передают, их калибровочные симметрии очень сильно зависят от геометрической формы свернутых измерений. Таким образом, повторим, мы пришли к пониманию того, что теория струн дает схему, объясняющую существующий набор частиц, переносящих взаимодействие, т. е. объясняющую свойства фундаментальных взаимодействий. Однако, не зная точно, в какое многообразие Калаби-Яу свернуты дополнительные измерения, мы не можем сделать определенных предсказаний или «послесказаний» (выходящих за рамки замечания Виттена о «послесказании» гравитации).

Почему мы не можем установить, какое из многообразий Калаби-Яу является «правильным»? Большинство теоретиков относит это к неадекватности теоретических инструментов, используемых в теории струн. В главе 12 мы покажем более подробно, что математический аппарат теории струн столь сложен, что физики способны выполнить только приближенные вычисления в рамках формализма, известного под названием теории возмущений. В этой приближенной схеме все возможные многообразия Калаби-Яу выглядят равноправными; ни одно из них не выделяется уравнениями. Поскольку физические следствия теории струн существенно зависят от точной формы свернутых измерений, не имея возможности выбрать единственное пространство Калаби-Яу из многих возможных, нельзя сделать определенных заключений, поддающихся экспериментальной проверке. Современные исследования нацелены на разработку теоретических методов, выходящих за рамки приближенного подхода, в надежде, что помимо других выгод это выделит единственное многообразие Калаби-Яу для дополнительных измерений. В главе 13 мы рассмотрим прогресс, достигнутый в этом направлении.

Перебирая возможности

Вы можете и так поставить вопрос: пусть неизвестно, какое из пространств Калаби– Яу выбирает теория струн, но позволяет ли какой-нибудь выбор получить физические характеристики, которые согласуются с наблюдаемыми? Другими словами, если мы рассчитаем физические характеристики, которые дает каждое возможное многообразие Калаби-Яу, и соберем их в один гигантский каталог, сможем ли мы найти среди них то, которое соответствует действительности? Это важный вопрос, однако есть две серьезные причины, по которым на него нельзя дать исчерпывающего ответа.

Разумно было бы начать исследование, ограничившись только теми пространствами Калаби-Яу, которые дают три семейства частиц. Это значительно сокращает список возможных вариантов. Однако обратите внимание: мы можем деформировать тор с ручками из одной формы во множество других – на самом деле, в бесконечное множество – без изменения числа отверстий. На рис. 9.2 мы показали одну такую деформацию формы, приведенной в нижней части рис. 9.1.

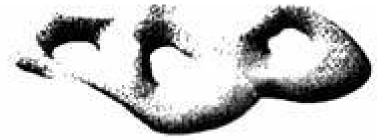

Рис. 9.2. Мы можем различными способами изменить форму тора с ручками, не меняя количества отверстий в нем; здесь показан один из таких способов.

Аналогично можно взять пространство Калаби-Яу с тремя отверстиями и плавно изменить его форму без изменения числа отверстий, опять же через бесконечное число промежуточных форм. (Когда выше мы говорили о десятках тысяч многообразий Калаби-Яу, мы уже сгруппировали все те многообразия, которые могут быть преобразованы друг в друга путем таких плавных деформаций, и учитывали такие группы как одно пространство Калаби-Яу.) Проблема состоит в том, что физические свойства колебаний струн, а также соответствующие им массы и константы взаимодействий, очень сильно зависят от подобных детальных изменений вида многообразия, а у нас, опять же, нет критериев для того, чтобы отдать одной из этих конкретных возможностей предпочтение перед другими. И неважно, сколько аспирантов усадят за эту работу профессора физики, невозможно перебрать все альтернативы, соответствующие бесконечному списку различных пространств.

Осознание этого побудило специалистов по теории струн исследовать физику, порождаемую выборкой из возможных многообразий Калаби-Яу. Но даже в этом случае ситуация остается непростой. Приближенные уравнения, используемые учеными в настоящее время, имеют недостаточную мощность для того, чтобы получить полную и точную физическую картину, которую дает выбранное многообразие Калаби-Яу. Эти уравнения позволяют значительно продвинуться вперед в отношении приблизительной оценки свойств колеблющейся струны, которые, как мы надеемся, будут соответствовать наблюдаемым частицам. Но точные и определенные физические вопросы, подобные тому, какова масса электрона или интенсивность слабого взаимодействия, требуют уравнений, точность которых намного превосходит ту, которую дают современные приближенные схемы. Вспомните главу 6 и пример с Верной ценой, где говорилось, что «естественным» мерилом энергии в теории струн является планковская энергия, и только благодаря необычайно точному механизму сокращений теория струн способна дать моды колебаний, массы которых близки к массам известных частиц вещества и частиц, переносящих взаимодействие. Искусные сокращения требуют точных расчетов, поскольку даже небольшие погрешности могут оказать большое влияние на результат. Как мы увидим в главе 12, в середине 1990-х гг. физики смогли добиться значительного прогресса в выходе за рамки современных приближенных уравнений, хотя сделать предстоит еще немало.

Итак, где же мы находимся? Да, мы столкнулись с проблемой отсутствия фундаментального критерия выбора конкретного многообразия Калаби-Яу. Да, у нас нет теоретических средств, необходимых для вывода наблюдаемых характеристик, соответствующих такому выбору. Но мы можем спросить, а есть ли в каталоге пространств Калаби-Яу какие-либо элементы, которые дают картину мира, в основном согласующуюся с наблюдениями? Ответ на этот вопрос звучит достаточно обнадеживающе. Хотя большинство элементов каталога дают картину, которая существенно отличается от нашего мира (в ней, помимо всего прочего, другое число семейств элементарных частиц, а также иные типы и константы фундаментальных взаимодействий), небольшое число многообразий дает физическую картину, которая на качественном уровне близка к наблюдаемой в реальности. Таким образом, существуют примеры пространств Калаби-Яу, приводящие к колебательным модам струн, подходящим для частиц стандартной модели, если выбирать эти пространства в качестве свернутых измерений, существование которых требуется в теории струн. И, что имеет первостепенную важность, теория струн успешно встраивает гравитационное взаимодействие в квантово-механическую схему.

Для современного уровня понимания это лучшее, на что мы могли рассчитывать. Если бы многие многообразия Калаби-Яу давали примерное совпадение с экспериментальными данными, связь между конкретным выбором и наблюдаемой физической картиной была бы

менее убедительной. Когда предъявляемым требованиям соответствуют многие варианты, ни один из них нельзя выделить даже с привлечением экспериментальных данных. С другой стороны, если бы ни одно многообразие Калаби-Яу не давало ничего даже отдаленно похожего на наблюдаемую физическую картину, мы могли бы сказать, что теория струн, конечно, прекрасная теоретическая структура, но она, по-видимому, не имеет отношения к нашему миру. То, что даже при наших весьма скромных современных способностях определения детальных физических следствий удалось найти небольшое число пригодных пространств Калаби-Яу, является чрезвычайно обнадеживающим фактом.

Объяснение свойств элементарных частиц и частиц-переносчиков фундаментальных взаимодействий было бы одним из великих, если не величайшим научным достижением. Тем не менее, у вас может возникнуть вопрос, существуют ли предсказания теории струн, в противоположность «послесказаниям», которые физики-экспериментаторы могут попытаться подтвердить уже сегодня или хотя бы в обозримом будущем. Такие предсказания есть.

Суперчастицы

Препятствия на пути теоретических исследований, которые не позволяют в настоящее время использовать теорию струн для получения детальных предсказаний, вынуждают нас к поиску не конкретных, а общих свойств Вселенной, состоящей из струн. В этом контексте слово «общие» указывает на характеристики, которые являются столь фундаментальными, что они мало чувствительны к тонким свойствам теории, которые в настоящее время недоступны для теоретического анализа или вообще не зависят от них. К таким характеристикам можно относиться с доверием, даже если мы не достигли полного понимания всей теории. В последующих главах мы обратимся к другим примерам, а сейчас сконцентрируем внимание на суперсимметрии.

Как мы уже отмечали, фундаментальное свойство теории струн состоит в том, что она обладает высокой симметрией, объединяя в себе не только наши интуитивные принципы симметрии, но и максимальное, с точки зрения математики, расширение этих принципов – суперсимметрию. Как говорилось в главе 7, это означает, что моды колебаний струны реализуются парами суперпартнеров, спин которых отличается на 1/2. Если теория струн верна, то некоторые из колебаний струн будут соответствовать известным частицам. Парность, связанная с суперсимметрией, позволяет теории струн сделать предсказание, что у каждой известной частицы имеется суперпартнер. Мы можем определить константы взаимодействия, которые должна иметь каждая из этих суперчастиц, однако в настоящее время не способны предсказать их массы. Но даже несмотря на это, предсказание существования суперпартнеров является общей особенностью теории струн; это свойство теории струн является истинным независимо от тех характеристик, которые пока не разработаны окончательно.

До настоящего времени никому не удавалось наблюдать суперпартнеров элементарных частиц. Это может означать, что они не существуют, и теория струн неверна. Однако по мнению многих специалистов по физике элементарных частиц это связано с тем, что суперпартнеры являются очень тяжелыми и поэтому не могут быть обнаружены на тех экспериментальных установках, которыми мы располагаем сегодня. В настоящее время физики сооружают гигантский ускоритель вблизи г. Женева в Швейцарии, получивший название Большого адронного коллайдера (В оригинале Large Hadron Collider. Коллайдер – ускоритель на встречных пучках, а адроны – частицы, участвующие в сильном взаимодействии. – Прим. перев.).

Есть надежда, что мощность этой установки будет достаточна для открытия частиц-суперпартнеров. Ускоритель должен вступить в действие к 2010 г., и вскоре после этого суперсимметрия может получить экспериментальное подтверждение. Как сказал Шварц: «До открытия суперсимметрии осталось ждать не так уж долго. И когда это

случится, это будет волнующее событие»17).

Есть, однако, два момента, о которых следует помнить. Даже если частицы-суперпартнеры будут обнаружены, один этот факт недостаточен для того, чтобы утверждать истинность теории струн. Как мы видели выше, хотя суперсимметрия была открыта в ходе работ над теорией струн, она может быть успешно включена в теории, основанные на точечной модели частиц и, следовательно, не является уникальным признаком теории струн. И обратно, если даже частицы-суперпартнеры не будут обнаружены с помощью Большого адронного коллайдера, один этот факт еще не позволяет отрицать теорию струн, поскольку он может быть связан с тем, что суперпартнеры слишком тяжелы, чтобы их можно было обнаружить на такой установке.

Тем не менее, если частицы-суперпартнеры будут обнаружены, несомненно, это будет сильное и вдохновляющее свидетельство в пользу теории струн.

Частицы с дробным электрическим зарядом

Другое возможное экспериментальное подтверждение теории струн, связанное с электрическим зарядом, является не столь фундаментальным, как существование суперпартнеров, но столь же удивительным. Ассортимент значений электрического заряда, который могут нести частицы в стандартной модели, очень ограничен: кварки и антикварки могут иметь (в единицах заряда электрона) положительный и отрицательный заряд, равный 1/3 и 2/з, а остальные частицы-0, + 1 и – 1. Комбинации этих частиц образуют все известное вещество Вселенной. Однако теория струн допускает существование мод резонансных колебаний, которым соответствуют частицы с существенно иным электрическим зарядом. Например, электрический заряд частиц может принимать ряд экзотических дробных значений, таких как 1/5, 1/11, 1/13 или 1/53. Эти необычные заряды могут возникать в том случае, когда свернутые измерения обладают определенным геометрическим свойством – наличием таких отверстий, что намотанные вокруг них струны могут распутаться, только сделав определенное число витков18). Детали этого явления не столь важны, заметим только, что число оборотов, которое должна сделать струна, чтобы распутаться, появляется в допустимых модах колебаний в знаменателе дробного значения электрического заряда.

Одни многообразия Калаби-Яу обладают этим геометрическим свойством, другие – нет, поэтому возможность дробных электрических зарядов не является такой фундаментальной, как существование частиц-суперпартнеров. С другой стороны, в то время как предсказание суперпартнеров не является эксклюзивной особенностью теории струн, десятилетия экспериментальных исследований не дали никакого повода ожидать, что столь экзотические электрические заряды могут существовать в какой-либо теории, основанной на точечной модели частиц. Конечно, их можно ввести в такие теории принудительно, но они там будут выглядеть так же уместно, как слон в посудной лавке. Возможность их объяснения из простых геометрических свойств, которые могут иметь дополнительные измерения, делает эти необычные электрические заряды естественным экспериментальным признаком теории струн.

Как и в случае с суперпартнерами, частиц с таким экзотическим электрическим зарядом пока никому не удалось наблюдать, а современный уровень развития теории струн не позволяет сделать определенные выводы о массе, которую могут иметь эти частицы, если в силу свойств дополнительных измерений они действительно существуют. Объяснение того, что они до сих пор не открыты, опять же состоит в том, что если они существуют, их массы находятся за пределами современных технических возможностей обнаружения. Весьма вероятно, что они близки к планковской массе. Но если будущие эксперименты смогут обнаружить такие экзотические электрические заряды, это будет очень сильное свидетельство в пользу теории струн.

Некоторые более отдаленные перспективы

Существуют и другие способы, которыми могут быть получены свидетельства истинности теории струн. Например, Виттен указал на то, что в один прекрасный день астрономы могут обнаружить в данных, которые они собирают, наблюдая за Вселенной, прямое свидетельство, оставленное теорией струн. Как указывалось в главе 6, обычно размер струн близок к планковской длине, однако струны, несущие большую энергию, могут вырасти до гораздо больших размеров. Энергия Большого взрыва могла быть достаточно высокой для образования небольшого числа крупных, макроскопических струн, которые в ходе расширения Вселенной могли вырасти до астрономических масштабов. Можно ожидать, что в наше время или когда-нибудь в будущем подобная струна пройдет по ночному небосводу, оказав несомненное и наблюдаемое влияние, которое будет зарегистрировано астрономами (например, небольшое смещение в температуре реликтового космического излучения, см. главу 14). Как однажды сказал Виттен: «Хотя это выглядит фантастично, но я бы предпочел именно такой сценарий подтверждения истинности теории струн – нельзя вообразить более волнующего способа решения вопроса, чем увидеть струну в телескоп»19).

Был предложен ряд других экспериментальных проверок теории струн на более близких к Земле расстояниях. Вот пять примеров. Во-первых, в табл. 1.1 мы отметили, что неизвестно, являются ли нейтрино очень легкими, или их масса в точности равна нулю. Согласно стандартной модели они являются безмассовыми, но это утверждение не имеет какого-либо глубокого обоснования. Теория струн могла бы принять этот вызов и дать истолкование известным фактам, касающимся нейтрино, и данным, которые могут быть получены в будущем. Особенно интересным было бы, если эксперименты, в конечном счете, показали, что нейтрино имеет небольшую, но ненулевую массу *(В 2002 г. экспериментально установлено, что нейтрино обладают (очень малой) массой. – Прим. ред.)* . Во-вторых, имеются некоторые гипотетические процессы, которые запрещены стандартной моделью, но которые допустимы теорией струн. Среди них возможный распад протона (не переживайте по этому поводу, если это и происходит, то очень медленно), а также возможные превращения и распады некоторых комбинаций кварков, которые нарушают некоторые давно установленные свойства квантовой теории поля, основанной на точечной модели частиц20'. Эти процессы особенно интересны тем, что их отсутствие в классической теории делает их индикаторами физических явлений, которые не могут быть учтены без использования новых теоретических принципов. Любой из этих процессов, если его удастся наблюдать, даст благодатную почву для объяснения с помощью теории струн. В-третьих, для некоторых пространств Калаби-Яу существуют моды резонансных колебаний, соответствующие новым взаимодействиям, поля которых отличаются небольшой интенсивностью и большим дальнодействием. Если будут обнаружены признаки существования этих новых взаимодействий, они могут быть истолкованы как отражение новых физических явлений, предсказываемых теорией струн. В-четвертых, как будет показано в следующей главе, астрономы собрали достаточно свидетельств в пользу того, что наша галактика и, возможно, вся Вселенная в целом, погружены в океан темного вещества, природу которого еще предстоит установить. Имея много возможных мод резонансных колебаний, теория струн предлагает ряд кандидатов на роль темного вещества; для вынесения окончательного вердикта необходимо дождаться результатов будущих экспериментальных исследований, которые должны детально определить характеристики темного вещества.

И, наконец, пятый возможный способ связать теорию струн с экспериментальными данными включает космологическую постоянную. Мы обсуждали ее в главе 3: она представляет собой дополнительный член, который был временно добавлен Эйнштейном к его первоначальным уравнениям обшей теории относительности, чтобы обеспечить стационарность Вселенной. Хотя в дальнейшем открытие расширения Вселенной побудило Эйнштейна вернуть уравнениям их первоначальный вид, за прошедшее с тех пор время

физики осознали, что не существует объяснения, почему космологическая постоянная должна быть равна нулю. В действительности, космологическая постоянная может интерпретироваться как суммарная энергия, содержащаяся в пустоте космического пространства, поэтому ее значение может быть рассчитано теоретически и измерено экспериментально. Однако расчеты и измерения, выполненные до сегодняшнего дня, демонстрируют колоссальное расхождение. Наблюдения показывают, что космологическая постоянная либо равна нулю (как, в конечном счете, полагал Эйнштейн), либо очень мала. Расчеты указывают, что квантовые флуктуации в вакууме дают ненулевое значение космологической постоянной, которое на 120 порядков (единица со 120 нулями) больше, чем значение, допускаемое экспериментальными данными! Это бросает вызов теоретикам и дает им замечательную возможность подтвердить свою правоту. Смогут ли они, используя методы своей теории, устранить это расхождение и объяснить, почему космологическая постоянная равна нулю? Или, если экспериментальные данные, в конечном счете, покажут, что космологическая постоянная имеет небольшое, но ненулевое значение, сможет ли теория струн объяснить этот факт? Если ученые, работающие над теорией струн, смогут ответить на этот вызов (что они пока не сделали), это даст убедительные свидетельства в поддержку данной теории.

Оценка ситуации

История физики содержит немало примеров идей, которые в момент своего появления казались совершенно не поддающимися проверке, но впоследствии получили полное экспериментальное подтверждение в результате разработки методов, появление которых трудно было предвидеть. Тремя примерами таких выдающихся идей, которые в настоящее время общеприняты, но которые в момент своего появления казались скорее научно-фантастическими, чем научными, являются: идея о том, что вещество состоит из атомов; гипотеза Паули о существовании частиц-призраков – нейтрино и гипотеза о том, что небеса усеяны нейтронными звездами и черными дырами.

Мотивы, которые привели к созданию теории струн, были не менее стимулирующими, чем в случае любой из трех идей, упомянутых выше, – в действительности, теория струн приветствовалась как наиболее важное и восхитительное достижение со времен появления квантовой механики. Это сравнение особенно уместно, поскольку история квантовой механики учит нас, что революции в физике легко могут затянуться на многие десятилетия, которые должны пройти, прежде чем новая теория достигнет зрелости. Между тем, если сравнивать современных специалистов по теории струн с физиками, которые были заняты разработкой квантовой механики, то у последних было большое преимущество: даже в незаконченной формулировке квантовая механика имела непосредственный контакт с экспериментальными данными. Несмотря на это, потребовалось около 30 лет на разработку логической структуры квантовой механики и еще примерно 20 лет на ее объединение со специальной теорией относительности. Мы заняты объединением квантовой механики и общей теории относительности, что представляет собой гораздо более сложную задачу, к тому же взаимодействие с экспериментом здесь очень затруднено. В отличие от тех, кто работал над квантовой механикой, ученые, которые сегодня занимаются разработкой теории струн, лишены яркого света природы, который дают детальные экспериментальные исследования и который направлял бы их шаг за шагом вперед.

Это означает, что наше поколение физиков и, возможно, несколько следующих посвятят свою жизнь исследованиям и разработкам в области теории струн, не имея совершенно никакой обратной связи с экспериментом. Немалое число физиков, которые по всему миру ведут энергичные исследования в области теории струн, знают, что они идут на риск: усилия всей их жизни могут не принести окончательного подтверждения теории. Не вызывает сомнений, что прогресс в теоретических исследованиях будет оставаться значительным, но будет ли он достаточен для того, чтобы преодолеть существующие

препятствия и сделать решающие, поддающиеся экспериментальной проверке предсказания? Помогут ли косвенные проверки, которые мы обсуждали выше, найти настоящее «дымящееся ружье» для теории струн? Эти вопросы очень важны для всех, кто занимается исследованиям в области теории струн, но дать на них ответ не может никто. Только время способно ответить на них. Чарующая простота теории струн, способ, которым она разрешает противоречие между гравитацией и квантовой механикой, ее способность объединить все компоненты мироздания и потенциально неограниченная предсказательная мощь – все это рождает вдохновение, оправдывающее риск. Эти высокие рассуждения постепенно находят все более основательное подкрепление благодаря способности теории струн открывать новые поразительные физические характеристики Вселенной, основанной на понятии струны, которые, в свою очередь, вскрывают тонкую и глубокую логику мироздания. Выражаясь языком, которым мы пользовались в этой главе, многие из этих характеристик являются общими принципами, которые станут фундаментальными свойствами построенной из струн Вселенной независимо от неизвестных сегодня деталей. Самые удивительные из них окажут глубокое влияние на наше постоянно развивающееся понимание пространства и времени.

Часть IV. ТЕОРИЯ СТРУН И СТРУКТУРА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Глава 10. Квантовая геометрия

Примерно за десятилетие Эйнштейн в одиночку сокрушил многовековые устои теории Ньютона, представив миру совершенно новую и значительно более глубокую теорию гравитации. И эксперты, и неспециалисты были покорены завораживающим изяществом и фундаментальной новизной формулировки общей теории относительности Эйнштейна. Не следует, однако, забывать о благоприятных исторических обстоятельствах, в значительной мере способствовавших успеху исследований Эйнштейна. Главное из них состоит в том, что Эйнштейну были известны математические результаты, полученные в XIX в. Георгом Бернгардом Риманом. Эти результаты давали возможность описания искривленных пространств произвольной размерности в рамках строгого геометрического аппарата. В знаменитой инаугурационной лекции 1854 г. в Геттингенском университете Риман перешел через Рубикон мышления в рамках плоского евклидового пространства и проложил дорогу к единообразному математическому описанию геометрии всех типов искривленных пространств. Именно пионерские идеи Римана позволили математикам дать количественное описание искривленных пространств, подобных тем, которые иллюстрировались на рис. 3.4 и 3.6. Гениальность Эйнштейна состояла в осознании того, что эти математические идеи были идеально приспособлены для выражения его новых взглядов на гравитационное взаимодействие. Он смело заявил о том, что математические понятия римановой геометрии безупречно согласуются с физикой гравитации.

Но сейчас, почти век спустя после научного подвига Эйнштейна, теория струн дает нам квантово-механическое описание гравитации, требующее пересмотра общей теории относительности на длинах порядка планковской. А так как в основе общей теории относительности лежит понятие римановой геометрии, то и само это понятие должно быть модифицировано для соответствия новой физике, возникающей на малых расстояниях в теории струн. И если в общей теории относительности постулируется, что свойства искривленного пространства Вселенной описываются геометрией Римана, то в теории струн утверждается, что данный постулат справедлив лишь в случае, когда структура Вселенной рассматривается на достаточно больших масштабах. На длинах порядка планковской должна вступать в игру новая геометрия, согласующаяся с новой физикой теории струн. Эту новую геометрию называют квантовой геометрией.

В отличие от геометрии Римана, здесь нет готовых геометрических рецептов, уже

описанных в книгах по математике и пригодных для того, чтобы занимающиеся струнами физики могли взять их на вооружение и использовать в этой науке. Напротив, современные физики и математики погружены в исследования в теории струн, по крупицам собирая знания, которые лягут в основу новой области физики и математики. И хотя основная часть работы еще впереди, в ходе этих исследований уже было открыто много новых диктуемых теорией струн геометрических свойств пространства-времени, которые наверняка произвели бы впечатление и на самого Эйнштейна.

Суть римановой геометрии

При прыжках на батуте его упругие волокна растягиваются под весом человеческого тела, и батут деформируется. Сильнее всего растяжение вблизи тела человека, а по мере приближения к краям батута растяжение менее заметно. Это наглядно видно, если на батут нанесено знакомое изображение (например, Мона Лиза). Если на батуте никто не стоит, изображение выглядит нормально, но если на батут встает человек, изображение искажается, в особенности непосредственно под человеком (см. рис. 10.1).

Рис. 10.1. Если на батуте с нанесенным изображением стоит человек, изображение сильнее всего искажается под весом тела человека.

Этот пример иллюстрирует важнейший принцип описания искривленных поверхностей, принятый в математической формулировке Римана. На основе более ранних наблюдений Карла Фридриха Гаусса, Николая Лобачевского, Яноша Бойяи и других математиков, Риман показал, что детальный анализ расстояний между всеми точками на поверхности объекта или внутри него дает способ вычисления значения кривизны. Грубо говоря, чем больше (неоднородное) растяжение, тем сильнее отклонение от формулы для расстояний в плоском случае, и тем больше кривизна объекта. Например, батут сильнее всего растягивается под ногами человека, и поэтому расстояния между точками в этой области будут сильнее всего отличаться от расстояний в случае ненагруженного батута. Следовательно, кривизна батута здесь будет максимальной. Это интуитивно ясно из приведенного рисунка: именно в таких точках изображение на батуте искажено сильнее всего.

Эйнштейн использовал математические результаты Римана и дал им точную физическую интерпретацию. Как обсуждалось в главе 3, Эйнштейн показал, что гравитационное взаимодействие обусловлено кривизной пространства-времени. Рассмотрим эту интерпретацию более подробно. С математической точки зрения, кривизна пространства-времени, подобно кривизне батута, означает искажение расстояний между точками. С физической точки зрения, действие гравитационной силы на тело есть прямое следствие этого искажения расстояний. По мере того как размеры тел уменьшаются, физика и математика должны согласовываться все лучше и лучше, потому что абстрактное математическое понятие точки становится все ближе к физической реальности. Однако теория струн ограничивает точность, с которой геометрическая формулировка Римана может соответствовать физической природе гравитации, ибо накладывает ограничение на минимальный размер, который вы можете придать физическому телу. Как только вы спускаетесь до размера струны, дальше дороги нет. В теории струн не существует

традиционного понятия точечной частицы: в противном случае с помощью теории струн было бы невозможно реализовать квантовую теорию гравитации. Это определенно свидетельствует о том, что риманова геометрия, в основе которой лежат вычисления расстояний между точками, на ультрамикроскопических масштабах модифицируется теорией струн.

Такое наблюдение несущественно для стандартных приложений общей теории относительности к изучению макросистем. Например, проводя исследования в области космологии, физики, не задумываясь, рассматривают огромные галактики в качестве точек, так как размер галактик пренебрежимо мал по сравнению с размером Вселенной. Этот грубый подход к формулировке римановой геометрии оказывается, тем не менее, исключительно точным – в области космологии успех общей теории относительности очевиден. Однако в ультрамикроскопической области в силу протяженных свойств струн риманова геометрия просто не является подходящим математическим формализмом. Как мы увидим ниже, она должна быть заменена квантовой геометрией теории струн, и эта замена приведет к возникновению поразительных и неожиданных новых эффектов.

Космологическая сцена

Согласно космологической модели Большого взрыва вся Вселенная образовалась в результате необычайного космического взрыва, произошедшего около 15 миллиардов лет назад. Как впервые обнаружено Хабблом, даже сегодня продолжают разлетаться «осколки» этого взрыва, представляющие собой миллиарды галактик. Вселенная расширяется. Нам неизвестно, продолжится ли это расширение бесконечно, или в какой-то момент расширение замедлится, затем прекратится, сменится сжатием, и, наконец, вновь приведет к космическому взрыву. Астрономы и астрофизики пытаются изучить этот вопрос экспериментально, так как ответ зависит от величины, которую, в принципе, можно измерить, а именно от средней плотности материи во Вселенной.

Если средняя плотность материи превысит так называемую критическую плотность, равную примерно 10-29 г/см3 (около 5 атомов водорода на каждый кубический метр Вселенной), то Вселенную пронзит всепроникающая гравитационная сила, которая остановит расширение и приведет к сжатию. Если средняя плотность материи меньше критической, то гравитационное притяжение будет слишком слабым, чтобы остановить расширение, и оно будет продолжаться вечно. (Основываясь на житейских наблюдениях, можно подумать, что средняя плотность Вселенной во много раз превышает критическое значение. Нужно, однако, иметь в виду, что материя, как и деньги, имеет тенденцию скапливаться в определенных местах. Использование средней плотности Земли, Солнечной системы или даже Млечного пути в качестве средней плотности Вселенной сродни использованию величины состояния Билла Гейтса для оценки среднего состояния простых смертных. Состояние большинства людей бледнеет по сравнению с состоянием Гейтса, и это приводит к значительному уменьшению среднего значения. Существование огромных и практически пустых пространств между галактиками ведет к колоссальному снижению средней плотности материи.)

Тщательно исследуя распределение галактик в пространстве, астрономы могут довольно точно предсказать среднюю плотность видимой материи во Вселенной. Она оказывается гораздо меньше критической. Однако имеются серьезные основания полагать (как с теоретической, так и экспериментальной точки зрения), что Вселенная пронизана темной материей. Эта материя не участвует в ядерном синтезе, происходящем в звездах, и поэтому не излучает свет. Следовательно, ее нельзя обнаружить с помощью телескопа. Никому еще не удавалось выяснить природу темной материи, не говоря уже о том, чтобы вычислить ее точное количество. А это означает, что будущее нашей Вселенной, которая в настоящий момент расширяется, остается неясным.

Рассмотрим, например, что произойдет, если плотность материи превышает

критическое значение, и однажды в далеком будущем расширение прекратится, после чего Вселенная начнет сжиматься. Все галактики сначала будут медленно приближаться друг к другу. затем, со временем, скорость их сближения возрастет, и они помчатся навстречу друг другу с огромной скоростью. Представьте себе всю Вселенную, сжимающуюся в один непрерывно уменьшающийся сгусток космической материи. Согласно главе 3, начиная с максимального размера во многие миллиарды световых лет, Вселенная сожмется до миллионов световых лет, и это сжатие будет ускоряться с каждой секундой. Все будет сжиматься сначала до размеров одной галактики, затем до размеров одной звезды, планеты, апельсина, горошины, песчинки. Далее, согласно обшей теории относительности, до размеров молекулы, атома, и, на неизбежной окончательной стадии Большого сжатия, до размеров точки. Согласно общепринятой теории Вселенная начала свое существование после взрыва в начальном состоянии нулевого размера, и если ее масса окажется достаточной, завершит свое существование коллапсом в аналогичное состояние окончательного космического сжатия.

Однако мы хорошо знаем, что если характерные длины приближаются к планковской или становятся меньше нее, уравнения общей теории относительности теряют свою силу ввиду квантово-механических эффектов. На таких масштабах длин нужно использовать теорию струн. В результате встает вопрос о том, к каким изменениям геометрической картины на основе общей теории относительности, в которой допустим сколь угодно малый размер Вселенной (так же, как в римановой геометрии допустим сколь угодно малый размер абстрактного многообразия), приведет использование теории струн. Вскоре мы увидим, что и здесь в теории струн имеются указания на ограничение физически достижимых масштабов длин, а новым замечательным следствием является невозможность сжатия Вселенной по любому пространственному измерению до размеров, меньших планковской длины.

Знакомство с теорией струн может вызвать у вас искушение высказать догадку, почему это так. Вы можете рассуждать, что независимо от того, сколько точек (имеются в виду точечные частицы) вы нагромождаете друг на друга, их суммарный объем остается равным нулю. Наоборот, если частицы – это струны, сжимающиеся при совершенно случайной ориентации, они заполнят шарик ненулевого размера, типа шарика планковских размеров, состоящего из спутанных резиновых лент. Такие соображения действительно не лишены смысла, но они не учитывают важные и тонкие свойства, изящно используемые в теории струн для обоснования минимального размера Вселенной. Эти свойства позволяют реально понять новую струнную физику и ее влияние на геометрию пространства-времени.

Чтобы пояснить эти важные стороны теории, рассмотрим сначала пример, в котором отброшены детали, несущественные для понимания новой физики. Вместо теории струн со всеми десятью пространственно-временными измерениями или знакомой нам Вселенной с четырьмя протяженными измерениями снова рассмотрим вселенную Садового шланга. Эта вселенная, имеющая два пространственных измерения, была введена в главе 8 до обсуждения теории струн с целью разъяснения идей Калуцы и Клейна 1920-х гг. Давайте использовать ее в качестве «космологической сцены» для исследования теории струн в простой постановке. Достигнутое понимание свойств этой теории будет использовано ниже для того, чтобы лучше разобраться со всеми пространственными измерениями в теории струн. С этой целью вообразим, что сначала циклическое измерение вселенной Садового шланга имеет нормальный размер, но затем начинает сжиматься все сильнее и сильнее, приближаясь по форме к Линляндии и приводя к Большому сжатию в упрощенном и частичном варианте.

Интересующий нас вопрос состоит в том, будут ли геометрические и физические характеристики этого космического коллапса иметь свойства, позволяющие явно отличить Вселенную, основанную на струнах, от Вселенной, основанной на точечных частицах.

Существенно новая черта

Не нужно много времени, чтобы обнаружить существенно новую характеристику физики струн. В нашей двумерной вселенной точечная частица может двигаться так, как показано на рис. 10.2: вдоль протяженного измерения Садового шланга, вдоль циклического измерения, или по обоим измерениям сразу.

Рис. 10.2. Точечные частицы, движущиеся по цилиндру.

Замкнутая струна может совершать аналогичные движения, с той разницей, что при движении по поверхности струна колеблется (рис. 10.3 а).

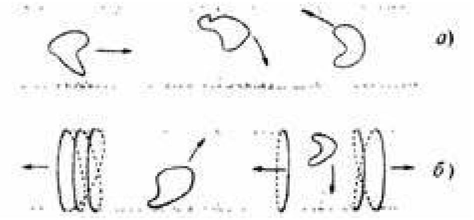

Рис. 10.3. Струны на цилиндре могут двигаться в двух конфигурациях – «ненамотанной» или «намотанной».

Это различие уже обсуждалось выше. Вследствие колебаний струна приобретает определенные характеристики, например массу и заряд. Это один из ключевых фактов теории струн, но он не является предметом настоящего обсуждения, так как его физические следствия уже рассмотрены выше.

Сейчас нас интересует другое отличие между движением частиц и струн, непосредственно связанное с формой пространства, где движется струна. Так как струна является протяженным объектом, она может существовать еще в одной конфигурации, отличной от упомянутых выше. Струна может наматываться (как лассо) на циклическое измерение вселенной Садового шланга (рис. 10.3б)1). Струна будет продолжать скользить и колебаться, но находясь в этой расширенной конфигурации. На самом деле, струна может намотаться на циклическое измерение любое число раз (как показано на том же рисунке) и одновременно осуществлять колебательные движения в ходе своего скольжения. Если струна имеет подобную намотанную конфигурацию, мы говорим, что она находится в топологической моде движения. Ясно, что топологическая мода может существовать только у струн. У точечных частиц не существует аналога этой моды. Попытаемся понять влияние этого качественно нового типа движения струны как на свойства самой струны, так и на геометрические свойства измерения, вокруг которого она намотана.

Физические свойства намотанных струн

Выше при обсуждении движения струн основное внимание уделялось ненамотанным струнам. Струны, которые могут наматываться по циклической пространственной координате, имеют почти тот же набор свойств, что и рассмотренные выше струны. Их колебания также вносят существенный вклад в наблюдаемые величины. Главное отличие состоит в том, что у намотанной струны имеется минимальная масса, определяемая размером циклического измерения и числом оборотов струны вокруг него. Колебания струны дают добавку к этой минимальной массе.

Нетрудно понять причину существования минимальной массы. У намотанной струны есть ограничение на минимальную длину: это ограничение определяется длиной окружности циклического измерения и числом оборотов струны вокруг этого измерения. Минимальная длина струны определяет ее минимальную массу. Чем больше эта длина, тем больше и масса, потому что при увеличении длины струна «растет». Так как длина окружности пропорциональна радиусу, минимальные вклады топологической моды в массу струны пропорциональны радиусу окружности, на которую намотана струна. Учитывая

соотношение Эйнштейна Е = тс2, связывающее массу и энергию, можно, кроме того, утверждать, что сосредоточенная в намотанной струне энергия пропорциональна радиусу циклического измерения. (У ненамотанных струн тоже есть очень малая минимальная длина, иначе это были бы не струны, а точечные частицы.

Аналогичные аргументы могли бы привести к заключению, что и ненамотанные струны имеют хоть и малую, но все же отличную от нуля массу. В определенном смысле это так, но квантово-механические поправки, рассмотренные в главе 6 (см. аналогию с телеигрой Верная цена), могут в точности сократить этот массовый вклад. Напомним, что именно так и происходит, когда в спектре ненамотанной струны возникают фотоны, гравитоны, а также другие безмассовые частицы или частицы с очень малой массой. Намотанные струны в этом отношении отличаются от ненамотанных.)

Каким образом существование топологических конфигураций струн влияет на геометрические свойства измерения, вокруг которого наматываются струны? Ответ, который был дан в 1984 г. японскими физиками Кейджи Киккавой и Масами Ямасаки, весьма примечателен и очень нетривиален.

Посмотрим, что происходит на последних катастрофических этапах Большого сжатия вселенной Садового шланга. Когда радиус циклического измерения достигает планковской длины и, в духе общей теории относительности, продолжает стягиваться до меньших размеров, в этот момент, согласно теории струн, необходим радикальный пересмотр модели происходящего. В теории струн утверждается, что в случае, когда радиус циклического измерения становится меньше планковской длины и продолжает уменьшаться, все физические процессы во вселенной Садового шланга происходят идентично физическим процессам в случае, когда радиус циклического измерения больше планковской длины и увеличивается! Это означает, что когда радиус циклического измерения пытается преодолеть рубеж планковской длины в сторону меньших размеров, эти попытки предотвращаются теорией струн, которая в этот момент меняет правила геометрии на противоположные. Теория струн говорит о том, что такую эволюцию можно переформулировать, т. е. переосмыслить, сказав, что когда циклическое измерение стянется до планковской длины, затем оно начнет расширяться. Законы геометрии на малых расстояниях переписываются в теории струн таким образом, что то, что ранее казалось полным космическим коллапсом, становится космическим расширением. Циклическое измерение может сжаться до планковской длины. Однако благодаря топологическим модам все попытки дальнейшего сжатия в действительности приведут к расширению. Рассмотрим, почему это происходит.

Спектр состояний струны

(Некоторые идеи этого и нескольких следующих разделов довольно нетривиальны, так что читателя не должно смущать то, что какие-то логические звенья в цепочке объяснений могут оказаться непонятными (особенно при первом чтении) Прим. перев.)

Возможность новых конфигураций намотанной струны означает, что у энергии струны во вселенной Садового шланга есть два источника: колебательное движение и намотка (топологический вклад). Согласно Калуце и Клейну, каждый тип энергии зависит от геометрии шланга, т.е. радиуса свернутой циклической компоненты, но эта зависимость имеет ярко выраженный «струнный» характер, так как точечные частицы не могут наматываться вокруг измерений. Поэтому попытаемся сначала определить точную зависимость топологических и колебательных вкладов в энергию струны от размера циклического измерения. Для этого удобно разделить колебательные движения струны на две категории: однородные и обычные колебания. Обычные колебания неоднократно рассматривались выше (например, колебания, иллюстрация которых приведена на рис. 6.2). Однородные колебания соответствуют еще более простому движению, а именно поступательному движению струны как целого, когда она скользит из одного положения в другое без изменения формы. Все движения струны являются суперпозициями

поступательных движений и осцилляции, т. е. суперпозициями однородных и обычных колебаний, однако сейчас нам удобнее рассматривать такое разделение движений струны. На самом деле обычные колебания играют второстепенную роль в наших рассуждениях, и поэтому их вклады будут учтены лишь после изложения сути наших доводов.

Отметим два существенных наблюдения. Во-первых, энергия однородных колебательных возбуждений струны обратно пропорциональна радиусу циклического измерения. Это является прямым следствием соотношения неопределенностей в квантовой механике. При меньших радиусах струна локализована в меньшем объеме, и поэтому энергия ее движения больше. Следовательно, при уменьшении радиуса циклического измерения энергия движения струны обязательно растет, что объясняет указанную обратно пропорциональную зависимость. Во-вторых, как выяснено в предыдущем разделе, топологические вклады в энергию прямо пропорциональны радиусу, а не обратно пропорциональны ему. Из этих двух наблюдений следует, что бблыпие значения радиуса соответствуют большим значениям топологической энергии и малым значениям колебательной энергии, а малые значения радиуса соответствуют малым значениям топологической энергии и большим значениям колебательной энергии.

В итоге получается важнейший результат: всякому большому радиусу вселенной Садового шланга соответствует некий малый радиус, при котором топологические энергии струны, вычисленные для вселенной с большим радиусом, равны колебательным энергиям струны, вычисленным для вселенной с малым радиусом, а колебательные энергии струны, вычисленные для вселенной с большим радиусом, равны топологическим энергиям струны, вычисленным для вселенной с малым радиусом. Но поскольку физические свойства зависят лишь от полной энергии конфигурации струны, а не от того, как эта энергия распределена между колебательным и топологическим вкладами, нет никакого физического различия между этими геометрически различными состояниями вселенной Садового шланга. А поэтому, что может показаться достаточно странным, в теории струн нет никакой разницы между вселенной толстого Садового шланга и вселенной тонкого Садового шланга.

Все это можно назвать «космическим страхованием сделки», что, в определенной мере, аналогично действиям вкладчика небольшого капитала, столкнувшегося со следующей дилеммой. Предположим, он узнал, что судьба акций одной компании (например, производящей тренажеры) неразрывно связана с судьбой акций другой компании (например, производящей сердечные клапаны для шунтирования). Допустим, что по завершении сегодняшних торгов акции каждой компании стоили по одному доллару, и из авторитетного источника известно, что если акции одной компании пойдут вверх, то акции другой компании упадут вниз, и наоборот. Кроме того, этот абсолютно надежный источник (деятельность которого, однако, может быть не очень-то законной) утверждает, что при завершении завтрашних торгов цены на акции этих двух компаний гарантированно будут обратно пропорциональны друг другу. Например, если одни акции будут стоить $2, то другие – $ 1/2 (50 центов), а если одни будут стоить $10, то другие – $1/10 (10 центов), и т.д. Однако какие именно акции пойдут вверх, а какие упадут в цене, источник сказать не может. Как поступить в такой ситуации?

Что же, вкладчик немедленно инвестирует все свои капиталы на биржевой рынок, распределив их в равных долях между акциями двух компаний. Сделав несколько оценок, легко убедиться, что капитал не уменьшится вне зависимости от того, что произойдет на рынке завтра. В худшем случае капитал не изменится (если акции обеих компаний по завершении торгов будут стоить $1), но любое изменение стоимости акций по известной от источника схеме приведет к увеличению вклада. Например, если акции первой компании будут стоить $4, а акции второй компании будут стоить $ 1/4 (25 центов), то их суммарная стоимость будет равна $4,25 (за каждую пару акций) против $2 накануне торгов. Более того, с точки зрения чистой прибыли совершенно не важно, акции какой компании выросли в цене, а какой компании упали. Если вкладчика волнуют только деньги, два различных исхода неразличимы в финансовом отношении.

Ситуация в теории струн аналогична в том смысле, что энергия струнных конфигураций есть сумма двух вкладов – колебательного и топологического, и эти вклады в полную энергию, вообще говоря, различны. Однако, как подробно обсуждается ниже, определенные пары разных геометрических состояний, соответствующие большой топологической/малой колебательной энергии и малой топологической/большой колебательной энергии, являются физически неразличимыми. И, в отличие от примера из области финансов, в котором при выборе между двумя видами акций могли бы играть роль соображения, отличные от соображений максимальной выгоды, здесь не существует совершенно никакого физического различия между двумя сценариями.

Как станет ясно далее, для более полной аналогии с теорией струн следует рассмотреть случай, когда начальное капиталовложение распределяется неравномерно между акциями двух компаний, например, покупается 1 000 акций первой компании и 3 000 акций второй компании. Теперь полная итоговая стоимость будет зависеть от того, какие акции упадут в цене, а какие вырастут. Например, если акции первой компании будут стоить $10, а акции второй – 10 центов, то начальное капиталовложение $4 000 вырастет до $10 300. Если случится противоположное, т.е. акции первой компании будут стоить 10 центов, а акции второй – $10, то капиталовложение вырастет до $30 100, что значительно больше.

Однако обратная зависимость цен акций гарантирует следующее. Если другой вкладчик распределяет капиталовложения прямо противоположным образом, т. е. покупает 3000 акций первой компании и 1 000 акций второй компании, то в результате он получит $10 300 в случае роста акций второй компании (ту же сумму, которую получит первый вкладчик в случае роста акций первой компании) и $30 100 в случае роста акций первой компании (снова ту же сумму, которую получит первый вкладчик в противном случае). Таким образом, с точки зрения полной стоимости акций обмен типов поднявшихся и упавших в цене акций в точности компенсируется обменом числа акций каждой из двух компаний.

Приняв к сведению последнее наблюдение, снова обратимся к теории струн и рассмотрим возможные энергии струны на конкретном примере. Предположим, что радиус циклического измерения вселенной Садового шланга в 10 раз больше планковской длины. Запишем это в виде формулы R = 10. Струна может быть намотана вокруг этого измерения один раз, два раза, три раза и т. д. Число оборотов струны вокруг циклического измерения называют топологическим числом (Английский термин winding number переводят по-разному: «число намоток», «индекс намотки», «топологический индекс», «топологическое число» и т.д. Мы будем переводить его как «топологическое число», подчеркивая связь с различными конфигурациями струны, которые нельзя получить одну из другой путем непрерывной деформации. – Прим. перев.) струны. Энергия, обусловленная намоткой струны, определяется длиной намотанной струны и пропорциональна произведению радиуса на топологическое число. Кроме того, любая струна способна совершать колебательные движения. Интересующие нас сейчас энергии однородных колебаний обратно пропорциональны радиусу, т. е. пропорциональны произведению целочисленных множителей на обратный радиус 1/R, равный, в данном случае, одной десятой планковской длины. Мы будем называть эти целочисленные множители колебательными числами2).

Видно, что ситуация очень напоминает ситуацию на фондовой бирже. При этом топологические и колебательные числа являются непосредственными аналогами количеств купленных акций двух компаний, а R и \/R играют роль цен на акции каждой компании по завершении торгов. Вычислить полную энергию струны, зная колебательное число, топологическое число и радиус, так же просто, как вычислить стоимость капиталовложения, исходя из количества акций каждой компании и стоимости акций после завершения торгов. В табл. 10.1 приведен ряд результатов для полных энергий различных конфигураций струн в случае вселенной Садового шланга радиуса R = 10.

Полная таблица была бы бесконечно длинной, так как топологические и колебательные числа могут принимать произвольные целые значения, однако представленный фрагмент

таблицы достаточен для обсуждения. Из таблицы видно, что она соответствует ситуации больших топологических вкладов и малых колебательных вкладов: топологические вклады кратны 10, а колебательные вклады кратны 1/10.

Таблица 10.1

Выборочные колебательные и топологические конфигурации струны, движущейся во Вселенной с радиусом R = 10 (рис. 10.3). Колебательные вклады в энергию кратны 1/10, а топологические вклады кратны 10. В результате получаются перечисленные значения полной энергии. Единицей измерения энергии является планковская энергия, т. е., например, 10,1 в правом столбце соответствует значению 10,1, умноженному на планковскую энергию

Таблица 10.2

Аналогична табл. 10.1, но значение радиуса выбрано равным 1/10

Таблица 10.1 Таблица 10.2

Колебательное число Топологическое число Полная энергия Колебательное число Топологическое число Полная энергия

1 1 1/10+ 10= 10,1 1 1 10+1/10= 10,1
1 2 1/10 + 20 = 20,! 1 2 10 + 2/10= 10,2
1 3 1/10 + 30 = 30,1 1 3 10 + 3/10= 10,3
1 4 1/10 + 40 = 40,1 1 4 10 + 4/10= 10,4
2 1 2/10+10= 10,2 2 1 20+1/10 = 20,1
2 2 2/10 + 20 = 20,2 2 2 20 + 2/10 = 20,2
2 3 2/10 + 30 = 30,2 2 3 20 + 3/10 = 20,3
2 4 2/10 + 40 = 40,2 2 4 20 + 4/10 = 20,4
3 1 3/10+ 10= 10,3 3 1 30+1/10 = 30,1
3 2 3/10 + 20 = 20,3 3 2 30 + 2/10 = 30,2
3 3 3/10 + 30 = 30,3 3 3 30 + 3/10 = 30,3
3 4 3/10 + 40 = 40,3 3 4 30 + 4/10 = 30,4
4 1 4/10+ 10= 10,4 4 1 40+ 1/10 = 40,1
4 2 4/10 + 20 = 20,4 4 2 40 + 2/10 = 40,2
4 3 4/10 + 30 = 30,4 4 3 40 + 3/10 = 40,3
4 4 4/10 + 40 = 40,4 4 4 40 + 4/10 = 40,4

Предположим теперь, что радиус циклического измерения сужается, скажем, с 10 до 9,2, затем до 7,1 и далее до 3,4, 2,2, 1,1, 0,7 и т.д. до 0,1 (1/10), где, в нашем примере, процесс сужения прекращается. Для такой геометрически иной формы вселенной Садового шланга можно построить аналогичную таблицу энергий струн. В ней топологические вклады кратны 1/10, а колебательные вклады кратны обратному значению, т.е. 10. Результаты сведены в табл. 10.2.

На первый взгляд может показаться, что таблицы совершенно различны. Но при более пристальном рассмотрении видно, что в столбцы полной энергии в обеих таблицах входят одинаковые элементы, хотя они и расположены в разном порядке. Чтобы найти элемент табл. 10.2, соответствующий данному элементу табл. 10.1, нужно просто поменять местами топологическое и колебательное число. Иными словами, колебательные и топологические вклады взаимно дополняют друг друга при изменении радиуса циклического измерения с 10 до 1/10. Поэтому с точки зрения полных энергий струн нет различия между этими двумя размерами циклического измерения. Как обмен типов акций в точности компенсировался обменом числа акций каждой из двух компаний, так и замена радиуса 10 на 1/10 в точности компенсируется заменой топологических и колебательных чисел. Кроме того, значения начального радиуса R – 10 и его обратного значения 1/10 выбраны в данном примере лишь для простоты, и результат будет тем же для любого радиуса3).

Табл. 10.1 и 10.2 не полны по двум причинам. Во-первых, как указано выше, здесь выбраны лишь некоторые из бесконечного набора колебательных и топологических чисел, возможных для струны. Это, разумеется, не является серьезной проблемой – мы могли бы

строить таблицу до тех пор, пока не иссякнет терпение, и убедились бы, что указанное свойство продолжает оставаться справедливым. Во-вторых, кроме топологического вклада в энергию мы до сих пор учитывали лишь однородные колебания струны. Сейчас необходимо учесть и обычные колебания, так как они дают дополнительный вклад в полную энергию струны и, кроме того, определяют переносимый струной заряд. Здесь важно отметить, что исследования свидетельствуют о независимости этих вкладов от радиуса. Поэтому, даже если эти вклады были бы включены в табл. 10.1 и 10.2, таблицы все равно точно соответствовали бы друг другу, так как обычные колебательные вклады учитывались бы в каждой таблице совершенно одинаковым образом. Следовательно, можно заключить, что массы и заряды частиц во вселенной Садового шланга радиусом R идентичны массам и зарядам частиц во вселенной Садового шланга радиусом \/R. А так как именно эти массы и заряды управляют фундаментальными физическими законами, нет никакого физического различия между двумя геометрически различными вселенными. Результаты любого эксперимента в одной вселенной и соответствующего эксперимента в другой вселенной будут в точности совпадать.

Спор двух профессоров

После превращения в двумерные существа Джордж и Грейс стали профессорами физики во вселенной Садового шланга. Они основали конкурирующие лаборатории, сотрудники каждой из которых вскоре заявили о том, что им удалось определить размер циклического измерения. На удивление, при всей безупречной репутации каждой лаборатории в области высокоточных исследований, результаты оказались разными. Джордж уверен в том, что радиус (в единицах планковской длины) равен R = 10, а Грейс утверждает, что значение радиуса равно R = 1/10.

«Грейс, – говорит Джордж, – мои вычисления по теории струн показывают, что если радиус циклического измерения равен 10, то энергии наблюдаемых мной струн должны соответствовать табл. 10.1. Я провел масштабные эксперименты на новом ускорителе с энергиями порядка планковской, и результаты в точности подтвердили это предположение. Следовательно, я совершенно определенно заявляю, что радиус циклического измерения равен R = 10». В свою очередь, Грейс приводит в защиту своего результата в точности те же доводы, но ее вывод состоит в том, что зарегистрированы значения энергий из табл. 10.2, и радиус, таким образом, равен R = 1/10.

Озаренная проблеском интуиции Грейс демонстрирует Джорджу, что несмотря на разное расположение элементов эти таблицы тождественны. Джордж, который, как всем известно, соображает несколько медленнее Грейс, отвечает: «Но как такое возможно? Я знаю, что, согласно принципам квантовой теории и свойствам намотанных струн, различные значения радиуса должны приводить к разным возможным значениям энергий и зарядов струн. И если эти значения согласуются, то и значения радиуса также должны находиться в согласии».

Грейс, во всеоружии своего нового понимания физики струн, отвечает: «То, что Вы говорите, почти, но не полностью правильно. Да, обычно верно, что для двух различных радиусов получаются различные допустимые энергии. Однако в частном случае, когда два значения радиуса обратно пропорциональны друг другу, например, как 10 и 1/10, допустимые энергии и заряды на самом деле одинаковы. Судите сами: то, что Вы назвали бы колебательной модой, я назвала бы топологической модой. Но природе безразлично, на каком языке мы говорим. Физические явления обусловлены свойствами фундаментальных составляющих – массами (энергиями) частиц и переносимыми ими зарядами. Не имеет значения, равен ли радиус R или 1/R: полный список значений свойств фундаментальных составляющих теории струн один и тот же».

В минуту прозрения Джордж отвечает: «Мне кажется, я понимаю. Хотя мое и Ваше детальное описание струн – их намотка на циклическое измерение или особенности их

колебательного поведения – могут отличаться, полный список их физических характеристик одинаков. А так как физические свойства Вселенной зависят от свойств фундаментальных составляющих, нет ни различия между радиусами, которые обратно пропорциональны друг другу, ни способа определить это различие». Именно так.

Три вопроса

Здесь читатель может спросить: «Будь я существом, живущим на Вселенной Садового шланга, я просто измерил бы длину окружности шланга рулеткой и однозначно определил бы радиус – без всяких „но" и „если". Так к чему вся эта чепуха о невозможности отличить два разных радиуса? Кроме того, разве теория струн не распрощалась с масштабами меньше планковской длины – зачем же эти примеры циклических измерений с радиусами в доли планковской длины? И, если уж на то пошло, кого волнует эта двумерная вселенная Садового шланга? Что все это добавляет к пониманию случая всех измерений?»

Начнем с третьего вопроса; ответ на него поставит нас лицом к лицу с двумя первыми.

Хотя обсуждение касалось вселенной Садового шланга, ограничение одним протяженным и одним циклическим пространственными измерениями было выбрано лишь для простоты. Если бы мы рассматривали три протяженных пространственных измерения и шесть циклических измерений – простейшее из всех многообразий Калаби– Яу, – результат был бы в точности тем же самым. У каждой окружности есть радиус, и если его заменить обратным радиусом, получится физически идентичная вселенная.

Этот вывод можно даже продвинуть на один гигантский шаг вперед. В нашей Вселенной наблюдаемы три пространственных измерения, каждое из которых, согласно астрономическим наблюдениям, имеет протяженность порядка 15 миллиардов световых лет (световой год равен примерно 9,46 триллионам километров, так что это расстояние равно примерно 142 миллиардам триллионов километров). Как отмечалось в главе 8, у нас нет данных о том, что происходит за этими границами. Мы не знаем, уходят ли эти измерения в бесконечность или замыкаются сами на себя, образуя огромные окружности – все это может иметь место за пределами чувствительности современных телескопов. Если справедливо последнее предположение, то путешествующий все время в одном направлении астронавт в конце концов обойдет вокруг Вселенной, как Магеллан вокруг Земли, и прилетит назад в исходную точку.

Следовательно, хорошо знакомые протяженные измерения могут тоже иметь форму окружностей, и поэтому они попадают под действие принципа физической неразличимости пространств с радиусами R и 1/R теории струн. Приведем несколько грубых оценок. Если привычные нам измерения являются циклическими, то их радиусы должны быть, как говорилось выше, около 15 миллиардов световых лет, т.е. примерно R = 1061 в единицах планковской длины, и эти радиусы должны увеличиваться при расширении Вселенной. Если теория струн верна, то картина физически эквивалентна ситуации, в которой привычные нам измерения имеют невообразимо малый радиус порядка 1/R = 1/1061 = 10-61 в единицах планковской длины! И это – хорошо нам знакомые измерения в альтернативном описании по теории струн. На самом деле, на этом взаимном языке эти крошечные окружности будут со временем становиться еще меньше, так как 1/R уменьшается, когда R растет. Кажется, мы основательно сели в лужу. Как такое возможно в принципе? Как двухметровый человек может втиснуться в такую невообразимо микроскопическую вселенную? Как такая невидимая крупинка может быть физически эквивалентной огромным просторам небес?

И, более того, здесь сам собой перед нами встает второй вопрос. Считалось, что теория струн налагает запрет на зондирование Вселенной на масштабах, меньших планковской длины. Но если радиус R больше планковской длины, то 1/R с необходимостью меньше нее. Так что же происходит на самом деле? Ответ, который также затрагивает первый из трех поставленных вопросов, выдвигает на первый план важные и нетривиальные свойства пространства и расстояния.

Два взаимосвязанных понятия расстояния в теории струн

В нашем понимании мира расстояние является настолько фундаментальным понятием, что очень легко недооценить всю его глубину и тонкость. Вспоминая поразительные изменения, которые претерпели понятия о времени и пространстве после открытия специальной и общей теории относительности, в свете новых результатов теории струн мы должны быть несколько более точными даже при определении расстояния. Наиболее осмысленными определениями в физике являются те, которые конструктивны, т. е. дают (по крайней мере, в принципе) способ для измерения того, что определяется. В конце концов, не важно, насколько абстрактным является понятие, – если в нашем распоряжении есть конструктивное определение, всегда можно свести смысл этого понятия к экспериментальной процедуре его измерения.

Как же дать конструктивное определение понятия расстояния? В рамках теории струн ответ на этот вопрос довольно неожиданный. В 1988 г. физики Роберт Бранденбергер и Кумрун Вафа из Гарвардского университета показали, что если пространственная форма измерения является циклической, в теории струн есть два различных, но связанных друг с другом конструктивных определения расстояния. Для каждого определения своя экспериментальная процедура измерения расстояния, и каждое определение, грубо говоря, основано на простом принципе измерения времени, за которое движущийся с постоянной фиксированной скоростью зонд проходит данный отрезок. Различие двух процедур состоит в выборе этого зонда. В первом случае используются струны, не намотанные вокруг циклического измерения, а во втором – струны, которые намотаны вокруг него. Свойство протяженности фундаментального зонда объясняет существование двух естественных конструктивных определений расстояния в теории струн. В теории точечных частиц, где намотка не имеет места, возможно лишь одно такое определение.

Чем отличаются результаты двух процедур? Ответ, который дали Бранденбергер и Вафа, столь же поразителен, сколь и нетривиален. Основную идею можно проиллюстрировать с помощью соотношения неопределенностей. Ненамотанные струны могут свободно двигаться в пространстве, и с их помощью можно измерить полную длину окружности, пропорциональную R. Согласно соотношению неопределенностей их энергии пропорциональны 1/R (вспомним отмеченную в главе 6 обратную пропорциональность энергии зонда расстояниям, которые он способен измерять). С другой стороны, мы видели, что минимальная энергия намотанных струн пропорциональна R. Поэтому, согласно соотношению неопределенностей, если такие струны используются в качестве зондов, то эти зонды чувствительны к расстояниям порядка \/R. Из математической реализации этой идеи следует, что если для измерения радиуса циклического измерения пространства используются оба зонда, с помощью ненамотанных струн будет измерено значение R, а с помощью намотанных – значение 1/R, где, как и выше, все результаты измерений расстояний выражены в единицах планковской длины. Есть равные основания считать результат каждого из измерений радиусом окружности: теория струн демонстрирует, что для разных зондов, которые используются для измерения расстояния, мы можем получить разные ответы. На самом деле это справедливо для всех измерений длин и расстояний, а не только для определения размера циклического измерения. Результаты, полученные с помощью ненамотанных и намотанных струнных зондов, будут обратно пропорциональны друг другу4).

Так почему же, если теория струн действительно описывает нашу Вселенную, мы до сих пор не сталкивались с различными понятиями расстояния в повседневной жизни или научных исследованиях? Всякий раз, говоря о расстояниях, мы опираемся на опыт, в котором есть место лишь для одного понятия расстояния и ни намека на другое понятие. Где мы упустили альтернативную возможность? Ответ в том, что при всей симметрии нашего подхода, для значений R (а, следовательно, и значений 1/R), сильно отличающихся от

единицы (что опять означает единицу, умноженную на планковскую длину), одно из конструктивных определений крайне сложно реализовать экспериментально, в то время как второе реализуется весьма просто. По существу, мы всегда выбираем самый простой подход, не подозревая, что существует другая возможность.

Значительное различие в сложности реализации двух подходов обусловлено значительным различием масс используемых зондов, т. е. различием между высокоэнергетической топологической и низкоэнергетической колебательной модой (и наоборот), если радиус R (и 1/R) сильно отличается от планковской длины (когда R = 1). При таких радиусах «высоким» энергиям соответствуют чрезвычайно большие массы зондов (в миллиарды миллиардов раз больше массы протона), а «низким» энергиям соответствуют исчезающе малые массы. Различие двух подходов при этом непреодолимо велико, так как даже создать столь тяжелые струнные конфигурации в настоящее время технически невозможно. На практике можно реализовать лишь один из двух подходов, а именно тот, в котором используется более легкая струнная конфигурация. До сего момента именно на него неявно опирались все предыдущие рассуждения, связанные с понятием расстояния; именно он питает нашу интуицию, и, следовательно, хорошо с ней согласуется.

Игнорируя практическую сторону вопроса, можно сказать, что в описываемой теорией струн Вселенной каждый вправе выбирать любой из двух подходов. Когда астрономы измеряют «размер Вселенной», они регистрируют фотоны, которые, путешествуя по Вселенной, волей случая попадают в их телескопы. Эти фотоны являются легкими струнными модами, и результат равен 1061 планковских длин. Если три известных нам пространственные измерения действительно циклические, а теория струн верна, то астрономы, использующие совершенно другое (в данный момент не существующее) оборудование, в принципе могли бы обмерять небеса тяжелыми модами намотанных струн. Они получили бы ответ, обратный этому огромному расстоянию. Именно в таком смысле можно считать, что Вселенная либо громадна (как мы обычно и считаем), либо крайне мала. Согласно информации, которую дают легкие моды струны, Вселенная громадна и расширяется, а согласно информации тяжелых мод – крайне мала и сжимается. В этом нет противоречия: просто используются два различных, но одинаково осмысленных определения расстояния. Из-за технических ограничений для нас гораздо привычнее первое определение, но и второе определение столь же законно.

Сейчас можно ответить на вопрос о двухметровых людях в крошечной вселенной. Когда мы измеряем человеческий рост, мы пользуемся легкими модами струны. Чтобы сравнить этот рост с размером Вселенной, для измерения размера Вселенной нужно использовать ту же процедуру, что даст 15 миллиардов световых лет – значительно больше, чем два метра. Спрашивать же, как двухметровый человек поместится в «крошечную» вселенную, так же бессмысленно, как сравнивать божий дар с яичницей. Если есть два понятия расстояния – на основе легких и на основе тяжелых мод, – то нужно сравнивать результаты измерений, сделанных одним и тем же способом.

Минимальный размер

Предыдущее обсуждение было лишь разминкой; теперь мы перейдем к главному. Если все время измерять расстояния «простым способом», т. е. использовать самые легкие моды струны вместо самых тяжелых, полученные результаты всегда будут больше планковской длины. Чтобы это понять, посмотрим, что будет происходить при гипотетическом Большом сжатии всех трех пространственных измерений в предположении, что они являются циклическими. Для определенности примем, что в начале мысленного эксперимента легкими являются моды ненамотанных струн и измерения с их помощью показывают, что радиус Вселенной огромен, а Вселенная сжимается. По мере сжатия эти моды будут становиться тяжелее, а топологические моды легче. Когда радиус уменьшится до планковской длины, т. е. R станет равным 1, массы топологических и колебательных мод станут сравнимы. Два

подхода к измерению расстояния окажутся одинаково сложными для осуществления, и, кроме того, оба они приведут к одинаковому результату, так как единица обратна самой себе.

По мере того как радиус будет продолжать уменьшаться, топологические моды станут легче, и, поскольку мы всегда выбираем «простой способ», именно они будут теперь использоваться для измерения расстояний. Так как этот метод измерения дает значения, обратные значениям в случае колебательных мод, радиус будет больше планковской длины, и этот радиус будет возрастать. Это простое следствие того, что при стягивании R (измеряемого с помощью ненамотанных струн) до 1 и дальнейшем сжатии, величина 1/R (измеряемая с помощью намотанных струн) будет увеличиваться до 1 и продолжать расти. Следовательно, если всегда следить за тем, чтобы для измерений использовались легкие моды струны, т. е. чтобы всегда использовался «простой способ» измерения расстояний, то минимальным зарегистрированным значением будет планковская длина.

В частности, здесь удается избежать Большого сжатия до нулевого размера: радиус Вселенной, измеряемый с помощью легких мод струн-зондов, всегда больше планковской длины. Вместо того чтобы переходить через значение планковской длины в сторону меньших размеров, радиус, измеряемый с помощью самых легких мод, уменьшается до планковской длины и тут же начинает расти. Сжатие заменяется расширением.

Использование легких мод струны согласуется с традиционным понятием длины, которое существовало задолго до открытия теории струн. Именно это понятие расстояния ответственно, как обсуждалось в главе 5, за возникновение неразрешимых проблем с бурными квантовыми флуктуациями в случае, если масштабы, меньшие планковских, считаются физически значимыми. Здесь еще с одной точки зрения видно, что с помощью теории струн можно избежать ультрамикроскопических расстояний. В физической формулировке общей теории относительности и в соответствующей математической формулировке римановой геометрии есть только одно понятие расстояния, и оно может быть сколь угодно малым. В физической формулировке теории струн и в разрабатываемой для нее области математики – квантовой геометрии – есть два понятия расстояния. Их осмысленное использование дает понятие расстояния, которое согласуется как с нашей интуицией, так и с общей теорией относительности, если масштабы достаточно велики, но радикально отличается от последних, если эти масштабы становятся малыми. Одно из отличий состоит в том, что расстояния, меньшие планковской длины, недосягаемы.

Приведенные утверждения достаточно сложны, поэтому еще раз подчеркнем один из главных моментов. Если мы принципиально будем игнорировать различие между «простым» и «трудным» подходами к измерению длины и будем, например, продолжать использовать моды ненамотанной струны при стягивании R за планковскую длину, то, казалось бы, мы действительно сможем измерить расстояния, меньшие планковской длины. Однако, как говорилось выше, слово «расстояния» в предыдущем предложении должно быть аккуратно определено, так как у этого слова два различных значения, и только одно из них соответствует нашему традиционному пониманию. А в данном случае, когда R становится меньше планковской длины, но мы продолжаем использовать ненамотанные струны (несмотря на то, что они теперь тяжелее намотанных), мы используем «трудный» подход к измерению расстояний, и смысл понятия «расстояние» не соответствует общеупотребительному значению этого слова. Эти рассуждения, однако, далеко выходят за рамки семантики или даже за рамки обсуждения удобства или практичности измерения. Даже если мы выберем нестандартное понятие расстояния, считая радиус меньшим, чем планковская длина, законы физики, как обсуждалось в предыдущих пунктах, будут идентичны законам физики во Вселенной, где этот радиус (в обычном понимании расстояния) будет больше планковской длины (об этом, например, свидетельствует точное соответствие табл. 10.1 и 10.2). А для нас важна именно физика, а не терминология.

На основе этих идей Бранденбергер, Вафа и другие физики предложили переписать законы космологии таким образом, чтобы в моделях Большого взрыва или возможного Большого сжатия фигурировала не Вселенная нулевого размера, а Вселенная, все размеры

которой равны планковской длине. Безусловно, это весьма интересное предложение для устранения математических, физических и логических нестыковок в описании Вселенной, рождающейся из точки с бесконечной плотностью и схлопывающейся в эту точку. Конечно, сложно вообразить себе Вселенную, сжатую до крошечной песчинки планковского размера, но вообразить себе Вселенную, сжатую до нулевого размера – вот это уж действительно слишком. Весьма вероятно, что более удобоваримую альтернативу стандартной модели Большого взрыва даст находящаяся сейчас в зачаточном состоянии струнная космология, которую мы обсудим в главе 14.

Насколько общий этот вывод?

Что произойдет, если пространственные измерения не являются циклическими? Будут ли и в этом случае справедливы замечательные утверждения теории струн о минимальных пространственных размерах? Никто не знает точного ответа. Важнейшее свойство циклических измерений состоит в том, что на них можно наматывать струны. Коль скоро на пространственные измерения можно наматывать струны, большинство выводов будут оставаться справедливыми вне зависимости от точного вида этих измерений. Но что будет, если, скажем, два измерения имеют вид сферы? Тогда нельзя заставить струны сохранять намотанную конфигурацию: они всегда могут «соскользнуть» подобно тому, как резинка может соскользнуть с мяча, на который она натянута. Накладывает ли теория струн ограничение на минимальный размер и в этом случае?

Судя по результатам многочисленных исследований, ответ зависит от того, сжимается ли все пространственное измерение (как в примерах этой главы), или (с чем мы столкнемся в главах 11 и 13) коллапсирует отдельный «кусок» пространства. Как считает большинство теоретиков, независимо от вида пространства существует минимальный предел сжатия всего пространственного измерения, и механизм возникновения этого предела во многом схож с механизмом в случае циклических измерений. Обоснование существования предела является важной задачей дальнейших исследований ввиду ее непосредственного влияния на многие аспекты теории струн, включая следствия для космологии.

Зеркальная симметрия

Создав общую теорию относительности, Эйнштейн связал физику тяготения с геометрией пространства-времени. На первый взгляд, теория струн укрепляет и расширяет связь между физикой и геометрией: свойства колеблющихся струн (например, массы и переносимые ими заряды) в значительной степени определяются свойствами свернутой компоненты пространства. Однако, как мы только что видели, квантовая геометрия, связывающая геометрические и физические стороны теории струн, обладает рядом удивительных свойств. В общей теории относительности, как и в «традиционной» геометрии, окружность радиуса R отличается от окружности радиуса \/R, что кажется незыблемым и очевидным, а в теории струн эти окружности физически неразличимы. Этот факт подталкивает нас пойти дальше и задаться вопросом, не существует ли геометрических структур пространства, отличающихся друг от друга еще сильнее (не только размером, но, возможно, и видом), но, тем не менее, физически неразличимых в теории струн?

В 1988 г. Ленс Диксон из Стэндфордского центра линейных ускорителей сделал важнейшее в этом отношении наблюдение, которое впоследствии было обобщено Вольфгангом Лерхе из ЦЕРНа, Вафой из Гарварда и Николасом Уорнером, работавшим в то время в Массачусетском технологическом институте. На основе эстетических соображений, основанных на понятии симметрии, эти физики выдвинули смелое предположение, что два различных многообразия Калаби-Яу, выбранные в качестве дополнительных измерений в теории струн, могут приводить к одинаковым физическим результатам.

Чтобы дать представление о том, как может оказаться справедливой подобная

кажущаяся невероятной гипотеза, вспомним, что число отверстий в добавочных измерениях Калаби-Яу определяет число семейств, в которые группируются возбуждения струны. Эти отверстия аналогичны отверстиям тора или его обобщений с несколькими ручками (рис. 9.1). К несчастью, на двумерном рисунке, который можно воспроизвести на странице, нельзя продемонстрировать то, что отверстия в шестимерном пространстве Калаби-Яу могут иметь различные размерности. Хотя такие отверстия трудно вообразить, их можно описать на понятном математическом языке. Суть состоит в том, что число семейств частиц, возникающих при возбуждениях струны, зависит только от числа всех отверстий, а не от числа отверстий каждой конкретной размерности (вот почему мы не заботились о том, чтобы изобразить разнообразные отверстия в главе 9). Предположим теперь, что у двух пространств Калаби-Яу число отверстий разных размерностей различно, но суммарное число отверстий одинаково. Так как число отверстий различных размерностей не совпадает, два этих пространства различны. Но так как суммарное число отверстий одинаково, число семейств в каждой Вселенной одно и то же. Конечно, это говорит о совпадении лишь одного физического свойства. Эквивалентность всех физических свойств – гораздо более сильное требование, но и совпадение одного свойства уже свидетельствует в пользу того, что гипотеза Диксона-Лерхе-Вафы– Уорнера может оказаться верной.

В конце 1987 г. я поступил на стажировку на физический факультет Гарвардского университета, где мне выделили кабинет по соседству с кабинетом Вафы. Так как тема моей диссертации была посвящена физическим и математическим свойствам свернутых измерений Калаби-Яу в теории струн, Вафа держал меня в курсе своих работ в этой области. Когда в конце 1988 г. он, стоя на пороге моего кабинета, сообщил о гипотезе, к которой они пришли совместно с Лерхе и Уорнером, я был весьма заинтересован, но отнесся к ней скептически. Интерес объяснялся тем, что в случае, если гипотеза окажется верной, она может открыть новые просторы исследований в теории струн, а скепсис был следствием понимания того, что догадки и установленные свойства теории – далеко не одно и то же.

На протяжении следующих месяцев я часто думал об этой гипотезе, и, честно говоря, почти убедил себя в том, что она неверна. Но вскоре, к моему удивлению, казалось бы, совершенно не связанные исследования совместно с Роненом Плессером, который в то время был аспирантом в Гарварде, а теперь работает в Институте Вейцмана и университете Дьюка, полностью изменили мое отношение к гипотезе. Плессер и я заинтересовались методами построения путем математических преобразований новых доселе неизвестных многообразий Калаби-Яу из заданного многообразия Калаби-Яу. Особенно притягательным нам казался метод орбифолдов, предложенный в середине 1980-х гг. Диксоном, Джеффри Харви из Чикагского университета, Вафой и Виттеном. Грубо говоря, этот метод состоит в склеивании различных точек на исходном многообразии Калаби-Яу согласно математической схеме, гарантирующей, что при склеивании снова получится многообразие Калаби-Яу. Эта процедура иллюстрируется на рис. 10.4.

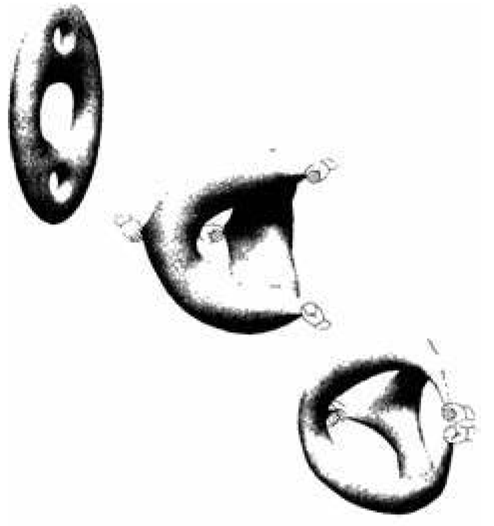

Рис. 10.4. Метод орбифолдов есть процедура построения нового многообразия Калаби-Яу путем склеивания различных точек на исходном многообразии.

Математические выкладки, стоящие за подобными манипуляциями, невообразимо сложны, и в этом причина того, что занимающимся струнами теоретикам удалось детально исследовать эту процедуру лишь применительно к простейшим многообразиям – многомерным обобщениям торов, изображенных на рис. 9.1. Однако мы с Плессером поняли, что ряд очень красивых утверждений Дорона Гепнера, работавшего тогда в Принстонском университете, может привести к мощной теоретической схеме, в рамках которой можно применить технику орбифолдов к сложным многообразиям Калаби-Яу, например, к изображенному на рис. 8.9.

После нескольких месяцев напряженной работы в этом направлении мы пришли к неожиданному выводу. Если склеивать определенные группы точек правильным образом, получающееся многообразие Калаби-Яу будет отличаться от исходного, но совершенно удивительным образом. Число отверстий нечетной размерности нового многообразия будет равно числу отверстий четной размерности исходного, и наоборот. Это, в частности, означает, что полное число отверстий, а, следовательно, и число семейств частиц в двух многообразиях будут одинаковыми, хотя из-за четно-нечетных замен вид многообразий и их фундаментальные геометрические свойства будут существенно разными5).

Воодушевленные очевидной связью с догадкой Диксона-Лерхе-Вафы-Уорнера, Плессер и я углубились в изучение центрального вопроса: будут ли эти два различных многообразия с одинаковым числом семейств частиц согласованы по остальным физическим свойствам? Через пару месяцев кропотливого математического анализа, подбадриваемые моим бывшим научным руководителем Грэмом Россом из Оксфорда и Вафой, мы с Плессером пришли к утвердительному ответу. По математическим соображениям, связанным с четно-нечетными заменами, мы назвали эти физически эквивалентные, но геометрически различные пространства Калаби-Яу зеркальными многообразиями6). Пространства зеркальных пар Калаби-Яу не являются в буквальном смысле зеркальными образами друг друга. Но при всем различии геометрических свойств, если эти пространства используются в качестве дополнительных измерений теории струн, они приводят к физически эквивалентным Вселенным.

Недели, последовавшие после того, как результат был получен, были крайне волнующими. Мы осознавали, что находимся вблизи новой области физики струн. Мы показали, что изначально установленная Эйнштейном тесная взаимосвязь между геометрией и физикой в теории струн существенно модифицируется. Радикально отличающиеся геометрические структуры, которые в общей теории относительности имели бы различные физические свойства, в теории струн приводят к эквивалентным физическим моделям. Вдруг мы сделали ошибку? Вдруг в их физических свойствах имеются тонкие отличия, которые мы не заметили? Например, когда мы сообщили о своих результатах Яу, он вежливо, но твердо сказал, что мы, должно быть, ошиблись; по его мнению, с математической точки зрения наши результаты слишком странные, чтобы оказаться справедливыми. Его мнение заставило нас взять длительный перерыв для проверок.

Одно дело ошибиться в скромном утверждении, которое мало кому интересно. Но наш результат был неожиданным шагом в новом направлении, и неминуемо вызвал бы бурные отклики. Если мы ошибемся, об этом узнают все.

В конце концов, после всех мыслимых проверок и перепроверок, убежденность в нашей правоте укрепилась, и мы решили опубликовать результат. Несколькими днями позже, когда я сидел в своем кабинете в Гарварде, зазвонил телефон. Это был Филипп Канделас из Техасского университета, который сразу же осведомился, сижу я или стою. Я сказал, что сижу. Канделас сообщил мне, что он и двое его студентов, Моника Линкер и Рольф Шиммригк, обнаружили закономерность, услышав о которой, я непременно упаду со стула. Тщательно изучив огромный набор пространств Калаби-Яу, моделированных на компьютере, они обнаружили, что почти все пространства идут парами, отличающимися

заменами чисел четномерных и нечетномерных отверстий. Я ответил ему, что все еще сижу: мы с Плессером получили тот же результат. Оказалось, что работа Канделаса и наша работа дополняют друг друга; мы с Плессером пошли на один шаг дальше и показали, что все физические свойства зеркальных пар одинаковы, а Канделас со своими учениками показал, что на пары разбивается гораздо большее число многообразий Калаби-Яу. Эти две работы и привели к открытию зеркальной симметрии в теории струн7).

Физика и математика зеркальной симметрии

Ослабление жесткой и однозначной эйнштейновской взаимосвязи между геометрией пространства и наблюдаемыми физическими явлениями есть яркий пример новизны теории струн. Однако развитие теории струн далеко не исчерпывается изменением философской концепции. Зеркальная симметрия, в частности, дает мощное средство для исследования как физических аспектов теории струн, так и математических аспектов теории пространств Калаби-Яу.

Математики, работающие в области так называемой алгебраической геометрии, изучали пространства Калаби-Яу из чисто математического интереса задолго до открытия теории струн. Они обнаружили множество свойств этих геометрических пространств, никоим образом не предполагая, что их результаты будут когда-нибудь использоваться физиками. Однако определенные черты теории пространств Калаби-Яу оказались слишком сложными для всестороннего математического исследования. Открытие зеркальной симметрии существенно изменило положение дел. По существу, зеркальная симметрия говорит о том, что определенные пары пространств Калаби-Яу, которые ранее считались совершенно независимыми, тесно связаны теорией струн. Связь состоит в том, что если в качестве дополнительных свернутых измерений выбирать два пространства из любой пары, получатся физически эквивалентные вселенные. Такая неожиданная взаимосвязь дает мощный инструмент математических и физических исследований.

Представим, например, что вы хотите вычислить физические характеристики – массы и заряды, – соответствующие выбору одного из возможных пространств Калаби– Яу в качестве дополнительных измерений. При этом вас не особенно заботит степень согласования ваших результатов с экспериментом, так как в настоящее время, в силу ряда рассмотренных выше теоретических и технических причин, экспериментальное подтверждение результатов достаточно проблематично. Вместо этого проводится мысленный эксперимент, который должен показать, как выглядел бы мир, если бы было выбрано данное пространство Калаби-Яу. Сначала все идет хорошо, но в середине такого теоретического анализа возникает необходимость математического расчета непомерной сложности. Никто, ни один из лучших специалистов-математиков, не может подсказать, как поступать дальше. Двигаться некуда. И тут выясняется, что у этого пространства Калаби-Яу есть зеркальный партнер. Поскольку окончательные физические свойства будут одинаковы для каждого члена зеркальной пары, вычисления можно проводить для любого из этих пространств. Таким образом, можно перевести сложное вычисление для первого из пространств на язык его зеркального партнера, и результат вычислений, т. е. физические свойства, будут теми же. Сначала можно предположить, что измененный вариант вычисления будет таким же сложным, как первоначальный. Но возникает приятная и поразительная неожиданность. Обнаруживается, что вид вычисляемого выражения очень сильно отличается от исходного, и, в некоторых случаях, невообразимо сложное вычисление становится поразительно легким в зеркальном пространстве. Не существует простого объяснения, почему это происходит, но, по крайней мере для определенных вычислений, это действительно так, и уменьшение сложности расчетов оказывается впечатляющим. В результате препятствие на пути решения задачи становится преодолимым.

Ситуация схожа со случаем, когда требуется точно подсчитать число апельсинов, плотно набитых в огромный ящик, скажем, со сторонами 15 м и глубиной 3 м.

Пересчитывать апельсины по одному крайне неблагодарное занятие. Но тут, к счастью, находится человек, который присутствовал в момент, когда завезли эти апельсины. Он сообщает, что апельсины были аккуратно упакованы в меньшие коробки, занимающие куб, по длине, ширине и глубине которого умещалось 20 коробок. Оценив, что число коробок равно 8 000, остается лишь вычислить, сколько апельсинов входит в одну коробку, и задача решена. В итоге, путем грамотного преобразования вычислений удается значительно упростить задачу. В теории струн ситуация с громоздкими вычислениями аналогична. Что касается пространств Калаби-Яу, вычисления могут состоять из очень большого числа этапов. Однако при переходе к расчетам для зеркального пространства вычисления можно гораздо более эффективно реорганизовать, так что выполнить их достаточно просто. Этот факт был отмечен Плессером и мной, а затем результативно использовался на практике в последующих работах Канделаса и его коллег Ксении де ла Осса и Линды Паркс из Техасского университета, а также Пола Грина из университета штата Мэриленд. Они показали, что вычисления невообразимой сложности могут быть проведены до конца с помощью идеи зеркальной пары, персонального компьютера и пары листов алгебраических выкладок.

Особенно захватывающим данный результат оказался для математиков, так как именно из-за этих вычислений многие их исследования годами находились в тупике. Теория струн, по крайней мере по утверждениям физиков, обогнала математику.

Здесь можно напомнить о многолетнем здоровом и добром соперничестве между физиками и математиками. Случилось так, что два норвежских математика, Гейр Эллингсруд и Штейн Арилд Штремме, работали над одной из многочисленных задач, которую Канделас и его коллеги успешно решили с использованием зеркальной симметрии. Грубо говоря, задача заключалась в вычислении числа сфер, которые можно упаковать внутрь некоторого пространства Калаби– Яу. Это подобно нашему примеру с подсчетом числа апельсинов в ящике. На семинаре в 1991 г. в Беркли, где собрались физики и математики, Канделас объявил о результате, полученном его группой с использованием теории струн и зеркальной симметрии: 317 206 375. Эллингсруд и Штремме, в свою очередь, объявили о результате своего очень сложного математического вычисления: 2 682 549 425. Несколько дней математики и физики спорили: кто же прав? Вопрос был принципиальным и мог, фактически, служить «лакмусовой бумажкой» для проверки достоверности количественных результатов теории струн. Некоторые даже шутливо замечали, что такая проверка – лучшее, что можно придумать ввиду невозможности проверки теории струн на эксперименте. Кроме того, в результате Канделаса заключалось нечто гораздо большее, чем просто число, каковым это было для Эллинг-сруда и Штремме. Канделас и его коллеги, кроме того, объявили о решении многих других задач неизмеримо большей сложности, за которые никогда не взялся бы ни один математик. Но можно ли верить результатам теории струн? Семинар закончился плодотворным обменом мнений между математиками и физиками, но причина расхождения результатов так и не была установлена.

Примерно месяц спустя участники семинара в Беркли получили по электронной почте письмо, озаглавленное «Физика победила!». Эллингсруд и Штремме нашли ошибку в своей компьютерной программе, и после ее исправления результат совпал с результатом группы Канделаса. С тех пор было проведено немало количественных проверок надежности расчетов в теории струн с помощью зеркальной симметрии. Теория струн с триумфом прошла все проверки. Еще позже, почти через десять лет после открытия физиками зеркальной симметрии, математики добились значительных успехов в выявлении математических принципов, лежащих в основе этой симметрии. Используя фундаментальные результаты математиков Максима Концевича, Юрия Манина, Ганга Тиана, Джуна Ли и Александра Гивенталя, Яу и его коллеги Бонг Лиан и Кефенг Лиу нашли, в конце концов, строгое математическое доказательство для обоснования формул, используемых для подсчета числа сфер внутри пространств Калаби-Яу, разрешив проблемы, которые сотни лет оставались камнем преткновения для математиков.

Эти исследования не просто оказались успешными для конкретного случая, но и выявили ту роль, которую физика начала играть в современной математике. Довольно долгое время физики рылись в архивах математических журналов в поисках средств для построения и анализа моделей физического мира. Сейчас, с открытием теории струн, физика начинает выплачивать свой долг и снабжать математиков новыми мощными подходами к неразрешенным проблемам. Теория струн не только предлагает единое описание физического мира, но и помогает установить глубокий и прочный союз с математикой.

Глава 11. Разрывая ткань пространства

Если непрерывно растягивать резиновую пленку, рано или поздно она порвется. Этот простой факт заставлял физиков годами обращаться к вопросу, возможно ли подобное по отношению к ткани пространства, создающего Вселенную. Может ли эта ткань разорваться, или такое вводящее в заблуждение представление есть результат слишком буквального понимания аналогии с резиновой пленкой?

Общая теория относительности Эйнштейна отвечает на вопрос о возможном разрыве структуры пространства отрицательно1'. Уравнения общей теории относительности основаны на римановой геометрии, которая, как отмечалось в предыдущей главе, позволяет проанализировать искажения свойств расстояний между соседними точками пространства. Чтобы формулы для расстояний были осмысленными, в математическом формализме требуется гладкость самого пространства. Понятие «гладкости» имеет конкретный математический смысл, но общеупотребительное значение слова «гладкость» хорошо передает суть этого понятия: гладкий – значит без складок, без проколов, без отдельных «нагроможденных» друг на друга кусков, без разрывов. Если бы в структуре пространства существовали такие нерегулярности, уравнения общей теории относительности нарушались бы, оповещая о космической катастрофе того или иного рода: зловещая перспектива, которую наша Вселенная благоразумно обходит.

Впрочем, эта зловещая перспектива не отпугивала склонных фантазировать теоретиков, которые годами исследовали возможность квантово-механического обобщения классической теории Эйнштейна, допускающего существование проколов, разрывов и слияний ткани пространства. Тот факт, что по законам квантовой физики на малых расстояниях происходят неистовые флуктуации, позволял предположить, что проколы и разрывы могут быть обычными явлениями в микроскопической структуре пространства. Понятие пространственно-временных червоточин *(В русскоязычной литературе более распространенным является термин «кротовые норы». – Прим. ред.)* (хорошо знакомое поклонникам фантастического сериала «Звездный путь») опирается на подобные предположения. Идея проста. Представим себе крупную корпорацию, управление которой находится на девяностом этаже одного из небоскребов. Исторически сложилось так, что отделение корпорации, с которым сотрудникам этого управления в последнее время все чаще приходится связываться, находится на девяностом этаже соседнего небоскреба. Так как переносить один из офисов в другое здание нецелесообразно, разумным решением было бы строительство моста, соединяющего две башни. Тогда сотрудники получили бы возможность переходить из офиса в офис, не спускаясь вниз и поднимаясь вверх на девяносто этажей.

Пространственно-временная червоточина играет схожую роль. Это мост или туннель, служащий укороченным маршрутом из одной области вселенной в другую. Пример червоточины в двумерной вселенной показан на рис. 11.1. Если управление «двумерной» корпорации находится вблизи нижней окружности рис. 11.1 а, то в ее отделение на верхней окружности можно попасть, лишь путешествуя по всему U-образному маршруту, ведущему из одного края вселенной в другой. Но если ткань пространства может рваться с образованием проколов, изображенных на рис. 11.1 б; если эти проколы могут «срастись» краями, как на рис. 11.1 в, то две ранее отдаленные области соединятся пространственным мостом. Это и есть червоточина. Нужно отметить, что хотя червоточина и мост между

небоскребами имеют некоторое сходство, между ними есть и существенное различие. Мост между небоскребами пролегает по существующему пространству, т. е. по пространству между небоскребами. Червоточина, в отличие от этого, образует новое пространство, ибо изображенная на рис. 11.1 а двумерная искривленная поверхность – это все, что имелось. Область вне поверхности лишь артефакт неадекватной картинки, которая не может изобразить U-образную вселенную иначе как погруженной в наш трехмерный мир.

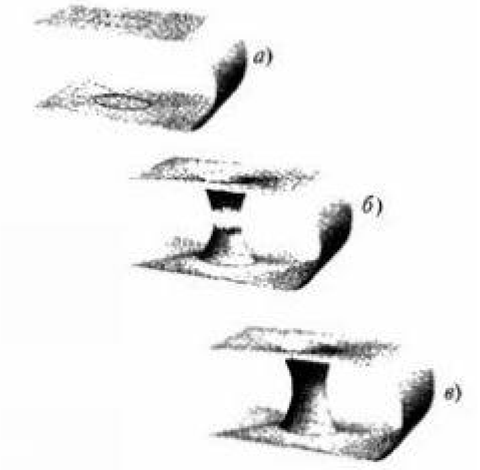

Рис. 11.1. а) «U-образная» вселенная, в которой достичь одного конца с другого можно лишь после длительного космического путешествия, б) Ткань пространства рвется, и два конца червоточины начинают вытягиваться, в) Два конца червоточины соединяются, образуя новый мост – «срезая путь» между двумя концами вселенной.

Червоточина создает новое пространство и потому прокладывает новую пространственную территорию. Существуют ли червоточины во Вселенной? Этого не знает никто. И если они действительно существуют, неясно, могут ли они быть только микроскопической формы, или перекрывать обширные области пространства, как в фантастических фильмах. Существование червоточин в реальном мире во многом определяется тем, возможен ли разрыв структуры пространства.

Другой яркий пример того, как ткань пространства может растягиваться до предела, дают черные дыры. На примере рис. 3.7 мы видели, что сильнейшее гравитационное поле черной дыры приводит к настолько сильной искривленности пространства, что оно выглядит проколотым в центре черной дыры. В отличие от червоточин, есть веские экспериментальные свидетельства в пользу существования черных дыр, и вопрос о том, что происходит в центре дыры, приобретает конкретный научный характер. В экстремальных условиях внутри черной дыры уравнения общей теории относительности становятся неприменимыми. По мнению некоторых физиков, в центре черной дыры действительно имеется прокол, но мы ограждены от этой космической «сингулярности» горизонтом событий, не позволяющим даже свету вырваться из гравитационной ловушки. Такие соображения привели Роджера Пенроуза из Оксфордского университета к «гипотезе космической цензуры», согласно которой подобные пространственные особенности возможны лишь в местах, тщательно скрытых от наших глаз пеленой горизонта событий. С другой стороны, до открытия теории струн некоторые физики считали, что корректное объединение квантовой теории и общей теории относительности «залатает» бросающиеся в глаза бреши в ткани пространства, сгладив его квантовыми поправками.

С открытием теории струн, органично связывающей квантовую теорию с гравитацией, появилась твердая почва для исследования этих вопросов. На сегодняшний день они окончательно не решены, но в последние годы были решены тесно связанные с ними вопросы. В этой главе мы покажем, что в теории струн впервые явно демонстрируется возможность разрыва ткани пространства при определенных физических явлениях (в некоторых отношениях отличных от явлений пространственных червоточин и черных дыр).

Волнующая возможность

В 1987 г. Шин-Тун Яу и его студент Ганг Тиан, работающий сейчас в Массачусетсом технологическом институте, сделали интересное математическое наблюдение. Используя хорошо известный математический прием, они обнаружили, что одни многообразия Калаби-Яу можно преобразовать в другие путем протыкания их поверхности и сшивания образовавшегося отверстия согласно строго определенной математической процедуре2). Грубо говоря, они обнаружили, что внутри исходного пространства Калаби-Яу можно выделить двумерную сферу определенного вида (рис. 11.2). (Двумерная сфера аналогична поверхности надувного мяча, который, как и все знакомые нам объекты, трехмерен. Здесь, однако, мы говорим только о поверхности, не учитывая толщину материала, из которого сделан мяч, а также пространство внутри него. Точки на поверхности мяча определяются двумя числами, «широтой» и «долготой», аналогично тому, как определяются координаты на поверхности Земли. Вот почему поверхность мяча, как и поверхность упоминавшегося в предыдущих главах Садового шланга, является двумерной.)

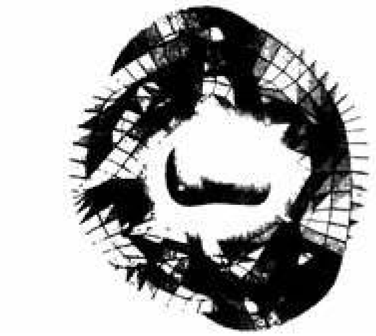

Рис. 11.2. В выделенной области внутри пространства Калаби-Яу находится сфера.

Далее они рассмотрели стягивание сферы в одну точку; этот процесс показан на рис. 11.3. Как и все последующие рисунки этой главы, он упрощен с целью наглядности изображения наиболее важного «куска» пространства Калаби-Яу: но вы должны помнить, что такие преобразования происходят внутри несколько большего пространства Калаби-Яу, подобного изображенному на рис. 11.2.

Рис. 11.3. Сфера внутри пространства Калаби-Яу. сжимается в точку, приводя к перетяжке в ткани пространства. На этом и следующих рисунках для простоты показана лишь часть всего пространства Калаби-Яу

И, наконец, Тиан и Яу рассмотрели случай, когда в точке сжатия пространство Калаби-Яу слегка надрывается (рис. 11.4 а), раскрывается и перестраивается в другую шарообразную фигуру (рис. 11.4 б), которую затем снова можно раздуть до нормального размера (рис. 11.4 в и 11.4 г).

Рис. 11.4. При разрыве перетяжки пространства Калаби-Яу возникает сфера, которая сглаживает его поверхность. Исходная сфера рис. 11.3 оказывается «перестроенной».

Математики называют последовательность таких действий флоп-перестройкой (В оригинале flop-transition. Некоторые термины, используемые автором в этой и следующих главах, не являются общепринятыми (и/или еще не имеют русского эквивалента): мы подошли к обсуждению вопросов, касающихся последних достижений в физике и

математике. – Прим. перев.)

Все происходит так, как будто надувной мяч «выворачивается» наизнанку внутри другого пространства Калаби-Яу. Тиан, Яу и другие математики показали, что при определенных условиях новое многообразие Калаби– Яу (см. рис. 11.4 г), будет топологически отличным от исходного (рис. 11.3 а). То есть, выражаясь привычным языком, не существует никакого способа деформировать исходное пространство Калаби-Яу, показанное на рис. 11.3 а, в конечное пространство Калаби-Яу, показанное на рис. 11.4 г, не разрывая на некотором промежуточном этапе структуры пространства Калаби-Яу.

С точки зрения математики процедура Яу и Тиана очень интересна, так как позволяет получить новые пространства Калаби-Яу из уже известных. Но действительная сила процедуры проявляется в области физики, где в этой связи возникает волнующий вопрос: если забыть об абстрактном характере данной математической процедуры, может ли в природе иметь место изображенная на рис. 11.3 а – 11.4 г последовательность превращений? Может ли произойти так, что вопреки предсказаниям теории Эйнштейна структура пространства способна рваться и затем восстанавливаться подобно тому, как описано выше?

Зеркальная перспектива

На протяжении нескольких лет после 1987 г., когда Яу сделал свое наблюдение, он часто советовал мне поразмыслить о возможных физических применениях флоп-перестроек. Я отнекивался. Мне казалось, что флоп-перестройки относятся только к абстрактной математике и не имеют никакого отношения к теории струн. Действительно, из главы 10, в которой было установлено существование минимального радиуса циклического измерения, можно сделать вывод, что в теории струн сфера на рис. 11.3 не может полностью стянуться к выколотой точке. Однако, как тоже отмечено в главе 10, если стягивается часть пространства (в данном случае – сферическая часть многообразия Калаби– Яу), а не все циклическое измерение, то аргументы, которые позволяют различать малые и большие радиусы, не применимы буквально. Тем не менее, возможность разрыва структуры пространства казалась маловероятной, даже при том, что запрещающие флоп-перестройку соображения не выдерживали серьезной критики.

Уже позже, в 1991 г., норвежский физик Энди Лютken и мой однокурсник по учебе в Оксфорде, а ныне профессор университета Дьюка, Пол Аспинуолл, задались вопросом, который впоследствии оказался очень интересным. Если перестраивается пространственная структура компоненты Калаби-Яу нашей Вселенной, как это будет выглядеть с точки зрения зеркального пространства Калаби-Яу? Чтобы понять, почему возник такой вопрос, нужно вспомнить, что физические свойства зеркальной пары пространств Калаби-Яу (если эти пространства используются в качестве дополнительных измерений) идентичны, но сложность математических расчетов, необходимых для установления этих физических свойств, может сильно отличаться. Аспинуолл и Лютken предположили, что математически сложный переход между рис. 11.3 и 11.4 может описываться гораздо проще в терминах зеркальных пространств, и физический смысл этого перехода станет гораздо понятнее.

В момент проведения этих исследований еще не было достаточного понимания зеркальной симметрии, чтобы иметь возможность ответить на поставленный вопрос. И все же Аспинуолл и Лютken отметили, что в зеркальном описании нет ничего такого, что свидетельствовало бы об абсурдных физических последствиях разрывов пространства при флоп-перестройках. Примерно в то же время мы с Плессером, развивая найденную нами идею зеркальных пар многообразий Калаби-Яу (см. главу 10), неожиданно сами столкнулись с необходимостью анализа флоп-перестроек. Математикам хорошо известен тот факт, что склеивание различных точек (подобное показанному на рис. 10.4), которое использовалось нами для построения зеркальных пар, приводит к геометрическим следствиям, идентичным перетягиванию и проколам на рис. 11.3 и 11.4. В соответствующей физической формулировке мы с Плессером, однако, не нашли явных противоречий. Более того,

вдохновленные результатами Аспинуолла и Люткена (а также результатом их предыдущей совместной работы с Грэмом Россом), мы пришли к выводу, что математически перетягивание можно «отреставрировать» двумя различными способами. Один из них приводит к пространству Калаби-Яу, соответствующему рис. 11.3 а, а другой – к пространству, соответствующему рис. 11.4 г. Это подсказало нам, что переход от рис. 11.3 а к рис. 11.4 г действительно может иметь место в реальном мире.

Таким образом, к концу 1991 г. у некоторых физиков, занимающихся теорией струн, возникло ясное ощущение того, что ткань пространства может разрываться. Но ни у кого из них не было технических методов, которые позволили бы твердо установить или опровергнуть справедливость этой замечательной гипотезы.

Медленный прогресс

В течение 1992 г. мы с Плессером время от времени возвращались к попыткам доказать, что структура пространства может подвергаться перестройкам с разрывами пространства. Наши расчеты частично подтверждали эту гипотезу в частных случаях, но строгого доказательства найти не удавалось. Весной Плессер съездил с докладом в Принстонский институт перспективных исследований. Там он встретился с Виттеном и в частной беседе рассказал ему о наших попытках дать интерпретацию математической процедуры флоп-перестройки с разрывом пространства в рамках теории струн. После того, как Плессер изложил свои соображения, Виттен отвернулся от доски и некоторое время, возможно минуту или две, молча смотрел в окно своего кабинета. Затем он повернулся к Плессеру и сказал, что если наши идеи окажутся правильными, то «это будет впечатляюще». Такая реакция Виттена побудила нас работать с удвоенной энергией. Однако вскоре исследования застопорились, и мы обратились к другим вопросам в теории струн.

Даже работая над другими задачами, я постоянно ловил себя на том, что возвращаюсь к мысли о возможности перестроек с разрывами пространства. Месяц от месяца во мне укреплялась уверенность, что они должны быть неотъемлемой частью теории струн. Из расчетов, сделанных ранее вместе с Плессером, а также из стимулирующих обсуждений с Дэвидом Моррисоном, математиком университета Дьюка, казалось, следовало, что возможность перестроек является естественным следствием зеркальной симметрии. Во время моего пребывания в Дьюке Моррисон и я, используя результаты гостившего в то же время в Дьюке Шелдона Каца из Оклахомского университета, наметили стратегию обоснования появления флоп-перестроек в теории струн. Однако когда мы приступили к вычислениям, оказалось, что они крайне громоздки: даже с использованием самого быстрого в мире компьютера на расчеты ушла бы сотня лет. Мы продвигались вперед, но нам явно не хватало новой идеи, которая значительно повысила бы эффективность нашего вычислительного метода. Не подозревая об этом, Виктор Батырев, математик из университета города Эссен, дал нам такую идею в двух своих статьях, опубликованных весной и летом 1992 г.

Батырев очень интересовался зеркальной симметрией, особенно после успешного решения Канделасом и соавторами описанной в конце главы 10 задачи о подсчете числа сфер. Однако Батырев, будучи математиком, был сбит с толку приемами, которые мы с Плессером использовали для нахождения зеркальных пар пространств Калаби– Яу. Хотя в нашем подходе применялись известные теоретикам методы, Батырев позже признался мне, что наша статья произвела на него впечатление «черной магии». Это было следствием исторически сложившихся культурных различий между математикой и физикой, и по мере размытия теорией струн границ каждой науки различия в языке, методах и стиле исследований становились все более явными. Физики больше похожи на композиторов-авангардистов, стремящихся обойти устоявшиеся правила и расширить границы дозволенного при поиске решения задачи. Математики же больше похожи на классических композиторов, обычно скованных рамками гораздо более жесткой схемы и с

неохотой воспринимающих переход к следующему шагу до тех пор, пока предыдущие шаги не были обоснованы со всей строгостью. У каждого подхода свои преимущества и недостатки, и каждый из них обладает своими уникальными возможностями для творческих исследований. Так же, как современную музыку нелепо сравнивать с классической, эти подходы нельзя сравнивать, чтобы выяснить, какой из них лучше – используемые методы в значительной степени определяются вкусами и подготовкой.

Батырев решил перевести схему построения зеркальных многообразий на более понятный математический язык, и это ему удалось. Под впечатлением белее ранней работы тайваньского математика Ши-Шир Роана, Батыреву удалось сформулировать последовательную математическую процедуру построения пар пространств Калаби-Яу, являющихся зеркальными близнецами друг друга. Его процедура сводится к нашей с Плессером, если применять ее для рассмотренных нами примеров, но приводит к более общей формулировке в терминах знакомых математикам понятий.

Оборотной стороной медали было то, что в работах Батырева использовались знания из неизвестных большинству физиков областей математики. Мне, например, удалось уловить суть его аргументов, но понимание многих важнейших моментов давалось с огромным трудом. Одно, тем не менее, было ясно: методы, описанные в его статье, при правильном их осознании и применении вполне могут дать второе дыхание исследованиям флоп-перестроек с разрывом пространства.

К концу лета, находясь под впечатлением результатов этих работ, я решил вернуться к задаче о флоп-перестройках и сконцентрировать на ней все свое внимание. От Моррисона я узнал, что он собирается провести год в Институте перспективных исследований, а Аспинуолл, по моим сведениям, тоже будет там на стажировке. После нескольких телефонных звонков и переписки по электронной почте я договорился, что тоже проведу осень 1992 г. в этом институте.

Рождение стратегии

Трудно вообразить себе лучшее место для многочасовой и напряженной исследовательской работы, чем Институт перспективных исследований. Этот институт, основанный в 1930 г., расположен среди слегка холмистых полей, примыкающих к идиллическому лесу, и находится в нескольких милях от территории Принстонского университета. Говорят, здесь ничто не может отвлечь вас от работы в Институте, потому что отвлекать просто нечему.

После отъезда из Германии в 1933 г. Эйнштейн обосновался в этом институте и прожил здесь до конца своей жизни. Не нужно напрягать воображение, чтобы представить его размышляющим о единой теории поля в безлюдной тишине и почти аскетической атмосфере окрестностей Института. В воздухе здесь витает дух наследия прошлых глубоких идей, и ощущение этого может быть или возбуждающим, или угнетающим, в зависимости от того, на какой промежуточной стадии находятся ваши исследования.

Как-то раз, вскоре после моего прибытия в Институт, мы с Аспинуоллом прогуливались по улице Нассау (главной торговой улице в Принстоне), рассуждая о том, где будем сегодня обедать. Вопрос не праздный, потому что Поль – большой любитель мясного, а я вегетарианец. В самый разгар обмена мнениями о стилях жизни он спросил, есть ли у меня идеи о том, какими новыми задачами стоило бы заняться. Я ответил, что есть, и подробно изложил свои соображения по поводу важности вопроса о том, возможны ли во Вселенной флоп-перестройки с разрывом пространства, если Вселенная действительно описывается теорией струн. Я также обрисовал ему стратегию своих действий и рассказал о недавно возникшей надежде на то, что работа Батырева может помочь восполнить недостающие пробелы в понимании. Я полагал, что проповедую новообращенному, и Поль будет возбужден перспективой этого исследования. Но я ошибся. Сейчас, задним числом, я понимаю, что его сдержанность объяснялась добродушной и давно возникшей тягой к

интеллектуальному соперничеству, в котором каждый из нас играет роль «адвоката дьявола» по отношению к идеям другого. Не прошло и нескольких дней, как он примкнул ко мне, и мы оба с головой погрузились в изучение флоп-перестроек.

К тому времени приехал и Моррисон. Втроем мы собрались в институтском кафе, чтобы выработать план действий. Мы были единодушны в том, что главная задача состоит в ответе на вопрос, могут ли переходы от рис. 11.3 а к рис. 11.4 г иметь место в нашей Вселенной. Однако решение этой задачи в лоб сулило непреодолимые препятствия, так как описывающие этот переход уравнения, особенно те из них, которые описывают разрыв пространства, крайне сложны. Вместо этого, мы решили переформулировать задачу в терминах зеркальных пространств, надеясь на то, что уравнения в этом случае будут более простыми. Идея схематически показана на рис. 11.5, где в верхнем ряду показана эволюция от рис. 11.3 а к рис. 11.4 г, а в нижнем – та же эволюция с точки зрения зеркальных многообразий Калаби-Яу.

Рис. 11.5. Флоп-перестройка с разрывом пространства (верхний ряд) и соответствующая зеркальная формулировка (нижний ряд).

Уже тогда нам было ясно, что в зеркальной формулировке физика струн обладает хорошими свойствами и свободна от всякого рода катастроф. На рис. 11.5 видно, что в нижнем ряду не наблюдается разрывов или проколов пространства. Однако самый сложный вопрос, к которому привело нас это наблюдение, заключался в том, не переходим ли мы через границы применимости зеркальной симметрии. И, несмотря на то, что верхние и нижние многообразия Калаби-Яу, изображенные в левой колонке на рис. 11.5, приводят к эквивалентным физическим результатам, верно ли, что на каждом шаге вправо, изображенном на рис. 11.5 (в процессе чего в середине обязательно встретятся фазы прокола-разрыва-восстановления) физические свойства исходной и зеркальной точки зрения идентичны?

Хотя у нас были достаточные основания считать, что важная связь между исходными и зеркальными многообразиями не нарушится в ходе преобразований, приводящих к разрыву пространства Калаби-Яу в верхней части рис. 11.5, мы понимали, что вопрос о том, останутся ли многообразия на рис. 11.5 зеркальными друг другу после разрыва, нетривиален. Это ключевой вопрос, так как если они останутся зеркальными, отсутствие катастрофы в зеркальной формулировке будет означать отсутствие катастрофы в исходной формулировке, и это станет доказательством того, что пространство в теории струн может разрываться. Мы поняли, что этот вопрос можно свести к вычислению. Нужно рассчитать физические свойства Вселенной для верхнего многообразия Калаби-Яу после разрыва (например, используя правое верхнее пространство Калаби-Яу на рис. 11.5) и физические свойства зеркального (по предположению) пространства (правого нижнего пространства Калаби-Яу на рис. 11.5), а затем сравнить, будут ли эти свойства одинаковы.

Этим расчетом Аспинуолл, Моррисон и я занимались осенью 1992 г.

Поздние вечера в последней обители Эйнштейна

Острый, как лезвие бритвы, ум Эдварда Виттена облечен в мягкие манеры, что часто приобретает насмешливый, почти иронический оттенок. Виттен общепризнанно считается наследником титула Эйнштейна в роли величайшего из живущих на Земле физиков. Некоторые даже считают его величайшим физиком всех времен. У Виттена неутолимая жажда к передовым исследованиям в физике, а его влияние на выбор направлений исследования в теории струн огромно.

Работоспособность Виттена стала легендой. По словам его жены Кьяры Наппи, которая занимается физикой в том же институте, Виттен часами сидит на кухне, мысленно

анализируя передовые достижения в теории струн и лишь изредка возвращаясь в комнату за ручкой и бумагой, чтобы проверить одну или две тонкие детали3). Другую историю рассказал стажер, которого как-то летом разместили в соседнем с Виттеном кабинете. Он описывал свое уныние, когда он часами мучился со сложными расчетами в теории струн под ритмичный и непрекращающийся стук клавиш из кабинета Виттена, свидетельствовавший о том, что прямо из головы Виттена в файлы на компьютере одна за другой струятся статьи, которые вскоре сыграют поворотную роль в науке.

Примерно через неделю после моего приезда, когда мы с Виттеном беседовали в институтском дворике, он справился о моих научных планах. Я рассказал ему о флоп-перестройках с разрывами пространства и о стратегии, которую мы в этой связи избрали. Услышав об этих идеях, Виттен крайне заинтересовался, но предупредил, что, по его мнению, расчеты будут чрезвычайно сложными. Он также отметил потенциально слабое звено в описанной стратегии, которое относилось к моей совместной работе с Вафой и Уорнером, проделанной несколькими годами ранее. Вопрос, который поднял Виттен, имел лишь косвенное отношение к нашему подходу, но этот вопрос побудил его заняться задачей, которая, в конце концов, оказалась связанной с нашими задачами и дополнительной по отношению к ним.

Аспинуолл, Моррисон и я решили разбить вычисления на два этапа. Естественное на первый взгляд разделение состояло в вычислении сначала физических характеристик, соответствующих последнему многообразию Калаби-Яу в верхнем ряду рис. 11.5, а затем характеристик, соответствующих последнему многообразию в нижнем ряду рис. 11.5. Если зеркальность не нарушается в результате разрыва для верхнего ряда, то эти два многообразия должны приводить к одинаковым физическим следствиям, так же, как к одинаковым следствиям приводит анализ двух исходных многообразий. (В такой постановке задачи не требуется проведения крайне сложных вычислений для верхнего многообразия в момент его разрыва.) Оказалось, что вычисления физических характеристик для последнего из верхнего ряда многообразий Калаби-Яу достаточно просты. Главная сложность состояла в том, чтобы сначала определить точный вид последнего многообразия Калаби-Яу в нижнем ряду на рис. 11.5 (которое, по предположению, является зеркальным образом верхнего многообразия), а затем получить для него соответствующие физические результаты.

Процедура решения второй задачи, т. е. вычисления физических характеристик последнего из многообразий Калаби-Яу в нижнем ряду, если известна его точная геометрическая форма, была разработана несколькими годами ранее Канделасом. Его подход, однако, подразумевал проведение длительных расчетов. Мы поняли, что для решения задачи в данном конкретном случае нужно написать хорошую компьютерную программу. Аспинуолл, – не только известный физик, но и крутой программист, – взял эту задачу на себя. Моррисон и я приступили к расчету первой задачи о нахождении точного вида пространства Калаби-Яу.

Мы чувствовали, что именно в этом месте работа Батырева может подсказать нам ряд важных моментов. Однако и на этот раз исторически сложившиеся культурные различия в подходах математиков и физиков, – в данном случае, Моррисона и меня, – стали тормозить продвижение вперед. Нам нужно было соединить мощь двух наук и найти математический вид нижних многообразий Калаби-Яу, которые соответствуют той же физической Вселенной, что и верхние многообразия, если флоп-перестройки с разрывами на самом деле имеют место в действительности. Но ни я, ни Моррисон не знали чужого языка достаточно хорошо для того, чтобы ясно увидеть путь к достижению этой цели. Стало очевидным, что и мне, и ему нужно срочно пройти курс в области, экспертом в которой является другой из нас. Поэтому днем мы решили с максимальной отдачей пытаться двигаться вперед в наших расчетах, а по вечерам по очереди играть друг для друга роли преподавателя и студента: я буду в течение часа или двух читать лекции для Моррисона по интересующим нас физическим вопросам, а затем он в течение часа или двух будет читать мне лекции по соответствующим математическим вопросам. Эти лекции обычно заканчивались около 11

вечера.

Мы стали твердо соблюдать такой ежедневный режим. Продвижение было медленным, но мы чувствовали, что все начинает понемногу вставать на свои места. Тем временем Виттен семимильными шагами двигался к разрешению вопроса о слабом звене, которое он обнаружил ранее. В его работе предлагался новый мощный метод, связывающий физические результаты в теории струн с математическими аспектами пространств Калаби-Яу. Аспинуолл, Моррисон и я почти ежедневно участвовали в импровизированных дискуссиях с Виттеном, и он рассказывал нам о новых перспективах, которые открываются в его подходе. С каждой неделей становилось все яснее, что его работа, основанная на совершенно ином подходе, с неожиданной стороны приближается к вопросу о флоп-перестройках. Аспинуолл, Моррисон и я поняли, что если мы в ближайшее время не закончим наши вычисления, Виттен отправит всех нас в нокаут.

О шести банках пива и работе по выходным

Ничто так благотворно не действует на мозг физика, как доза здорового соперничества. Аспинуолл, Моррисон и я вошли в азарт. Нужно отметить, что для Аспинуолла это означало одно, а для нас с Моррисоном совершенно другое. В характере Аспинуолла своеобразно сочетаются утонченность английского аристократа, во многом благодаря десяти годам студенчества и аспирантуры в Оксфорде, и озорное плутовство. Режим, в котором он работает, делает его одним из самых дисциплинированных физиков, которых я когда-либо знал. В то время как многие из нас засиживаются допоздна, Аспинуолл никогда не работает позже пяти часов вечера. В то время как многие из нас работают по выходным, Аспинуолл никогда этого не делает. Он чинно откланивается, потому что к этому моменту он успевает сделать все. Для него войти в азарт означает еще выше поднять планку эффективности своей работы.

Было начало декабря. Моррисон и я к тому времени обучали друг друга уже несколько месяцев, и это обучение начало себя оправдывать. Мы были очень близки к тому, чтобы установить точный вид искомого пространства Калаби-Яу. Более того, Аспинуолл почти закончил писать свою компьютерную программу и ждал нашего результата, который должен был служить ее начальными данными. Ночью в четверг нам с Моррисоном, наконец, стало совершенно ясно, как можно определить вид искомого пространства Калаби-Яу. Это сводилось к некоторой процедуре, которая также требовала своей (довольно простой) компьютерной программы. К полудню пятницы мы написали и отладили программу, а к позднему вечеру у нас на руках был результат.

Но это была пятница, и уже перевалило за 5 пополудни. Аспинуолл ушел домой, и не вернется до понедельника. Мы оказались в ситуации полного бессилия без его компьютерной программы. Но ни Моррисон, ни я и в мыслях не могли представить, что придется ждать все выходные: мы стояли на пороге решения вопроса о разрывах структуры пространства мироздания, мучившего нас столько времени, и бездействие было невыносимым. Мы позвонили Аспинуоллу домой и стали упрашивать его прийти в офис завтра утром. Сначала он решительно отказался. Но после долгого ворчания в трубку он все же согласился присоединиться к нам, если мы ему принесем блок из шести банок пива. Мы согласились.

Момент истины

Как и планировалось, мы встретились в Институте в субботу утром. Ярко светило Солнце, и настроение у всех было шутливо-расслабленным. Я был наполовину уверен, что Аспинуолл так и не появится, а когда он все же пришел, минут пятнадцать пел ему дифирамбы по поводу первого в его жизни прихода в офис в выходной день. Он заверил меня, что это больше не повторится.

Мы все сгрудились вокруг компьютера Моррисона, стоявшего в нашем кабинете. Аспинуолл объяснил Моррисону, как запустить программу и какой точный вид должны иметь вводимые в нее данные. Моррисон привел полученные ночью результаты к нужному виду, и теперь все было готово.

Расчет, который нужно было провести, грубо говоря, сводился к определению массы конкретной частицы, являющейся колебательной модой струны при ее движении во вселенной, компоненту Калаби-Яу которой мы изучали всю осень. Мы надеялись, что в соответствии с выбранной нами стратегией масса окажется точно такой же, что и масса в случае многообразия Калаби-Яу, возникшего после флоп-перестройки с разрывом пространства. Последнюю массу вычислить было легко, и мы сделали это несколькими неделями раньше. Ответ оказался равным 3 в определенной системе единиц, которой мы пользовались. А так как сейчас проводился численный расчет на компьютере, то ожидаемый результат должен был быть близким к числу 3, что-то вроде 3,000001 или 2,999999; отличие от точного ответа объяснялось бы ошибками округления.

Моррисон сел за компьютер. Его палец завис над клавишей «Enter». Напряжение нарастало. Моррисон выдохнул «поехали» и запустил программу. Через пару секунд компьютер выдал ответ: 8,999999. Мое сердце упало. Неужели действительно флоп-перестройки с разрывом пространства нарушают зеркальную симметрию, а значит, вряд ли существуют в реальности? Но в следующее же мгновение мы сообразили, что здесь какая-то глупая ошибка. Если в массах частиц на двух многообразиях действительно есть отличие, почти невероятно, что компьютер выдал бы результат, столь близкий к целому числу. Если наши идеи неверны, то с тем же самым успехом компьютер мог бы выдать ответ, состоящий из совершенно случайных цифр. Мы получили неправильный ответ, но неправильность его была такого вида, из которого напрашивался вывод о том, что где-то мы допустили банальную ошибку. Аспинуолл и я подошли к доске, и моментально ошибка была найдена: мы забыли множитель 3 в «простом» вычислении несколько недель назад, так что правильный результат должен был равняться 9. Поэтому ответ компьютера – это как раз то, на что мы надеялись.

Конечно, совпадение результата после того, как найдена ошибка, является лишь наполовину убедительным. Если известен желаемый результат, очень легко найти способ его получить. Нам срочно требовался другой пример. Имея все необходимые программы, придумать его не представляло сложности. Мы вычислили массу еще одной частицы на верхнем многообразии Калаби-Яу, на этот раз с особой тщательностью, чтобы избежать еще одной ошибки. Ответом было число 12. Мы снова окружили компьютер и запустили программу. Через несколько секунд был получен ответ 11,999999. Согласие. Мы доказали, что предполагаемое зеркальное пространство является зеркальным пространством, и флоп-перестройки с разрывами пространства являются частью теории струн.

Я вскочил со стула и, опьяненный победой, сделал круг по комнате. Моррисон, сияя, сидел за компьютером. И только реакция Аспинуолла была нестандартной. «Здорово. Я и не сомневался, что все так и будет, – спокойно сказал Аспинуолл. – А где мое пиво?»

Подход Виттена

В понедельник мы с победоносным видом направились к Виттену, чтобы сообщить ему о нашем успехе. Он был очень рад нашему результату. Оказалось, что он тоже только что нашел способ доказательства существования флоп-перестроек в теории струн. Его аргументация была совершенно иной и значительно проясняла понимание того, почему пространственные разрывы на микроскопических масштабах не приводят к катастрофическим последствиям.

Подход Виттена акцентирует различие между теорией точечных частиц и теорией струн в случае таких разрывов. Суть различия в том, что вблизи разрыва возможны два типа движения струны и только один тип движения точечной частицы. А именно, струна может

двигаться, примыкая к разрыву, как и точечная частица, но, кроме того, она может опоясывать разрыв при движении, – что недоступно для точечной частицы, – как показано на рис. 11.6.

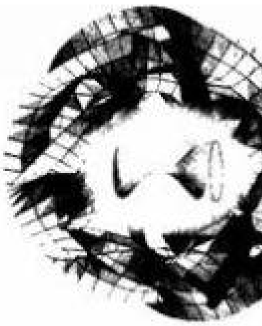

Рис. 11.6. Мировая поверхность, заметаемая струной, служит экраном, который гасит потенциально катастрофические эффекты при разрыве структуры пространства.

В результате опоясывания области разрыва струна экранирует окружающую ее Вселенную от катастрофических последствий, которые имели бы место в противном случае. В теории струн все происходит так, как будто мировая поверхность струны (двумерная поверхность, которую заметает струна при ее движении в пространстве, см. главу 6) эффективно играет роль барьера, на котором все пагубные воздействия геометрического вырождения пространства в точности сокращаются.

Здесь читатель вправе задать вопрос. Что будет, если разрыв действительно произойдет, но поблизости не окажется струн, которые экранировали бы его? Насколько эффективную защиту от этой кластерной бомбы, взрывающейся в момент разрыва пространства, может дать бесконечно тонкая «броня» струны? Ответ на оба вопроса основан на важнейшем квантово-механическом эффекте, рассмотренном в главе 4. Там было показано, что в фейнмановской формулировке квантовой механики объект, будь то струна или частица, движется от одной точки к другой, «разведывая» все возможные траектории. Наблюдаемое в результате движение есть объединение всех возможностей, и отдельные вклады каждой возможной траектории в движение точно определяются формулами квантовой механики. Если структура пространства внезапно разорвется, то среди всех возможных траекторий движущихся струн окажутся и те, которые опоясывают место разрыва (см. рис. 11.6). И хотя кажется, что около разрыва может не оказаться струн, в квантовой механике учитываются все возможные их траектории, и среди таких траекторий многие (в действительности, бесконечное число) будут опоясывать место разрыва. Виттен показал, что вклады именно этих траекторий сокращают эффект космической катастрофы, к которой привел бы разрыв пространства.

В январе 1993 г. Виттен и мы втроем одновременно послали наши работы в электронный архив статей в Интернете, из которого статьи моментально становятся доступными во всем мире. В наших статьях, основанных на двух совершенно различных точках зрения, приводились первые примеры переходов с изменением топологии – такое название мы дали процедуре с разрывом пространства. Давний вопрос о том, могут ли происходить разрывы пространства, был разрешен теорией струн и подтверждался количественными расчетами.

Следствия

Мы добились большого успеха в понимании того, как могут происходить разрывы пространства без катастрофических физических последствий. Но что на самом деле происходит при таких разрывах? Какие следствия разрыва могут быть наблюдаемыми? Мы видели, что многие свойства окружающего нас мира зависят от конкретной структуры свернутых измерений. Поэтому естественно предположить, что радикальное изменение пространства Калаби-Яу при преобразовании, показанном на рис. 11.5, будет иметь

серьезные физические последствия. Однако на самом деле на двумерных иллюстрациях, которыми мы пользуемся для того, чтобы представить себе пространства, картина происходящего в действительности преобразования несколько усложнена. Если бы нам удалось наглядно изобразить шестимерную геометрию, мы бы увидели, что структура пространства действительно рвется, но не так уж сильно. Повреждения больше похожи на изящные следы, оставляемые молью на пальто, чем на результат резкого приседания в брюках, из которых вы давно выросли.

В нашей работе, как и в работе Виттена, показано, что физические характеристики (например, число семейств струнных мод и типы частиц каждого семейства) не изменяются в ходе этих процессов. То, что может действительно меняться при преобразованиях пространства Калаби-Яу, на промежуточном этапе которых происходит разрыв, это массы отдельных частиц, т. е. энергии возможных мод колебаний струны. В наших работах было показано, что эти массы будут непрерывно изменяться в ответ на изменение геометрического вида компоненты Калаби-Яу, причем некоторые будут увеличиваться, а некоторые – уменьшаться. Важно, однако, то, что при разрыве не возникнет катастрофических скачков или других резких изменений значений меняющихся масс. С точки зрения физики момент разрыва пространства ничем не примечателен.

Здесь возникают два вопроса. Во-первых, мы рассматривали разрывы структуры пространства в дополнительном шестимерном пространстве Калаби-Яу. Могут ли эти разрывы возникать в трех наблюдаемых нами измерениях Вселенной? Почти наверняка могут. Пространство есть пространство, независимо от того, является оно туго скрученным в многообразие Калаби-Яу или развернутым до вселенских просторов, обширность которых мы понимаем, глядя лунной ночью на звездное небо. На самом деле, как мы видели, привычные нам пространственные измерения могут сами быть свернуты в гигантскую фигуру, замыкающуюся саму на себя в направлении другого конца Вселенной, и поэтому само деление измерений на свернутые и развернутые несколько искусственно. Хотя наш анализ, как и анализ Виттена, опирался на определенные математические свойства многообразий Калаби-Яу, тот результат, что структура пространства может разрываться, несомненно, имеет более широкие рамки применимости.

Во-вторых, может ли разрыв с изменением топологии произойти сегодня или завтра? Мог ли он иметь место в прошлом? Да. Экспериментальные исследования показывают, что массы элементарных частиц довольно стабильны во времени. Но на ранних стадиях после Большого взрыва даже в теориях, отличных от теории струн, рассматриваются важные периоды, в течение которых массы элементарных частиц менялись. С точки зрения теории струн в эти периоды, несомненно, происходили переходы с изменением топологии, рассмотренные в этой главе. Говоря о временах более близких к настоящему моменту, наблюдаемая стабильность масс элементарных частиц означает, что если сейчас Вселенная находится на стадии перехода с изменением топологии, то он происходит настолько медленно, что влияние на массы элементарных частиц невозможно зарегистрировать на современных экспериментальных установках. Примечательно, что пока выполняется это условие, наша Вселенная может находиться в данный момент в кульминации пространственного разрыва. Если разрыв происходит достаточно медленно, мы даже не поймем, что он происходит. Это один из редких примеров в физике, когда отсутствие поразительного экспериментально наблюдаемого феномена есть повод для сильного возбуждения. Отсутствие наблюдаемых катастрофических последствий при таком экзотическом изменении геометрии демонстрирует, как далеко продвинулась теория струн по сравнению с ожиданиями Эйнштейна.

Глава 12. За рамками струн: в поисках М-теории

В долгих поисках единой теории Эйнштейн размышлял о том, «мог ли Бог сотворить мир другим, оставляет ли какую-то свободу требование логической простоты»1). Это

замечание Эйнштейна предвосхищает точку зрения, которой сегодня придерживаются многие физики: если у нас есть окончательная теория природы, то одним из самых убедительных аргументов в пользу ее конкретной структуры является то, что теория не могла бы быть другой. Окончательная теория должна иметь тот вид, который она имеет, потому что она дает уникальную формулировку, в рамках которой можно объяснить Вселенную, не натыкаясь на внутренние или логические противоречия. В подобной теории должно постулироваться, что все вокруг устроено именно так потому, что оно должно быть устроено именно так. Любое сколь угодно малое расхождение приводит к теории, которая, подобно фразе «это предложение является ложным», содержит в себе семена своей собственной несостоятельности.

Установление такой неизбежности в структуре Вселенной потребует долгого пути и вплотную приведет нас к разрешению глубочайших вопросов мироздания. Эти вопросы подчеркивают загадку: кто или что сделал выбор среди бессчетного числа вариантов? Неизбежность упраздняет эти вопросы путем отметания других возможностей. Неизбежность означает, что в действительности другого выбора нет. Неизбежность постулирует, что Вселенная не может быть иной. Как мы увидим в главе 14, нет причин, по которым Вселенная должна иметь такую жесткую конструкцию. Тем не менее, поиск этой жесткости законов природы лежит в основе программы объединения в современной физике.

К концу 1980-х гг. теория струн, по мнению физиков, хотя и приблизилась к построению единой картины Вселенной, но не выдержала экзамен на «отлично». На то были две причины. Во-первых, как вскользь отмечено в главе 7, физики обнаружили, что существует пять различных вариантов теории струн. Напомним, что их называют теориями типа I, типа IIA, типа IIB, а также теориями гетеротических струн на основе групп O(32) (O-гетеротические струны) и E8xE8 (E-гетеротические струны). Многие основные свойства этих теорий совпадают: колебательные моды определяют возможные массы и заряды, общее число требуемых пространственных измерений равно 10, их свернутые измерения должны быть многообразиями Калаби-Яу и т.д. Мы не говорили об их различиях в предыдущих главах, однако, как выяснилось в конце 1980-х гг., эти теории действительно отличаются друг от друга. В примечаниях в конце книги можно прочесть о свойствах этих теорий, но здесь для нас важно то, что в них по-разному реализуется суперсимметрия и есть существенные различия между допустимыми колебательными модами2). (Например, в теории струн типа I кроме обсуждаемых нами замкнутых струн имеются открытые струны.) Теоретики, занимавшиеся струнами, чувствовали себя неуютно: хоть и впечатляет иметь на руках серьезную кандидатуру на окончательную единую теорию, но если таких кандидатур пять, непонятно, как распределить время на исследование каждой из них.

Вторая причина отклонения от неизбежности более тонкая. Чтобы понять ее в полной мере, нужно признать, что все физические теории состоят из двух частей. Первая часть – это набор основных идей теории, выраженных, как правило, в виде математических уравнений. Вторая часть состоит из решений этих уравнений. Вообще говоря, одни уравнения допускают только единственное решение, а другие – более одного решения (возможно, много более). (Например, уравнение «2 умножить на некоторое число равно 10» имеет одно решение: 5. Однако уравнение «0 умножить на некоторое число равно 0» имеет бесконечно много решений, так как любое умноженное на 0 число дает 0.) Тем самым, даже если получается строго определенная теория со строго определенными уравнениями, искомая неизбежность еще под вопросом, ибо уравнения могут иметь множество различных решений. В конце 1980-х гг. казалось, что ситуация в теории струн обстоит именно так. Когда физики начинали исследовать уравнения любой из пяти теорий, выяснялось, что у этих уравнений действительно много решений, например много возможных способов свертывания дополнительных измерений, и каждое решение соответствует вселенной со своими свойствами. И хотя все эти вселенные возникали в качестве полноправных решений уравнений теории струн, большинство из них, казалось, не имеет никакого отношения к наблюдаемому нами миру.

Эти отклонения от неизбежности могли бы считаться досадным фундаментальным недостатком теории струн. Но исследования, начавшиеся в середине 1990-х гг., дали надежду на то, что этот недостаток есть просто следствие того, как физики теоретики подходят к анализу теории струн. В двух словах, дело в том, что уравнения теории струн настолько сложны, что никто даже не знает их точного вида. Физикам удалось найти лишь приближенный вид этих уравнений. Именно эти приближенные уравнения сильно отличаются для разных теорий струн. И именно они в любом из пяти подходов приводят к избытку решений, рогу изобилия лишних вселенных.

С 1995 г. (начало второй революции в теории суперструн) растет число свидетельств в пользу того, что точные уравнения, вид которых до сих пор находится за пределами наших познаний, могут разрешить эти проблемы и, тем самым, придадут теории струн статус неизбежности. К удовлетворению большинства занимающихся теорией струн физиков уже доказано, что точные уравнения, когда их вид будет ясен, вскроют связь между всеми пятью теориями струн.

Как лучи морской звезды, все они являются частями одного организма, который в настоящее время пристально исследуется теоретиками. Физики уверены, что вместо пяти различных теорий должна существовать одна, объединяющая все пять в рамках общего теоретического формализма. Эта теория приведет к ясности, всегда возникающей при выявлении скрытых зависимостей между различными областями исследования, и даст новый мощный подход к пониманию структуры Вселенной в рамках теории струн.

Чтобы объяснить эти идеи, нам придется воспользоваться рядом самых сложных и самых современных результатов теории струн. Необходимо понять суть приближений, используемых в теории струн, а также присущие им ограничения. Нам нужно ближе познакомиться с искусными методами, известными под собирательным названием дуальностей, которые физики применяют для выхода за рамки некоторых приближений. Затем мы должны по шагам разобраться в каждом этапе аргументации, опирающейся на эти методы, и прийти к указанным выше замечательным выводам. Но не нужно пугаться: вся действительно сложная работа уже выполнена теоретиками, а нам остается лишь проиллюстрировать их результаты.

Тем не менее есть множество, казалось бы, не связанных элементов, которые нам придется исследовать и соединить воедино, поэтому в данной главе особенно просто не разглядеть за деревьями леса. Поэтому, если обсуждение в этой главе начнет казаться слишком запутанным и возникнет желание пропустить ее и перейти к черным дырам (главе 13) или космологии (главе 14), мы вам рекомендуем все-таки вернуться к следующему параграфу, где сведены вместе ключевые идеи второй революции в теории суперструн.

Краткое изложение результатов второй революции в теории суперструн

Важнейший результат, полученный в ходе второй революции в теории суперструн, показан на рис. 12.1 и 12.2. На рис. 12.1 изображена ситуация до того, как стало возможным (частично) выйти за рамки приближенных методов, традиционно используемых физиками для исследований в теории струн. Однако, как показано на рис. 12.2, в свете последних результатов видно, что подобно лучикам морской звезды все теории струн рассматриваются сейчас как части единого целого. (К концу этой главы, на самом деле, станет ясно, что даже и шестая теория – шестой лучик звезды – будет вписана в это объединение.)

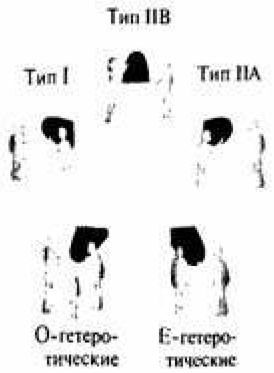

Рис. 12.1. Многие годы физики, работавшие с пятью теориями струн, думали, что они исследукп совершенно различные теории.

Рис. 12.2. Результаты, полученные в ходе второй революции в теории суперструн, показали, что все пять теорий в действительности являются частью единого формализма, условно названного М-теорией.

Этот единый формализм по причинам, которые станут ясными в дальнейшем, условно назвали М-теорией. Рис. 12.2 иллюстрирует эпохальное достижение в поисках окончательной теории. Тропы исследований в теории струн, которые, казалось, ведут в разные стороны, слились в одну широкую дорогу – единую и всеохватывающую теорию, которая вполне может оказаться искомой «теорией всего».

Хотя предстоит проделать еще много работы, две основные характеристики М-теории уже установлены физиками. Во-первых, М-теория рассматривает одиннадцать измерений (десять пространственных и одно временное). Подобно тому, как Калуца внезапно обнаружил, что одно дополнительное пространственное измерение можно использовать для объединения гравитации с электромагнетизмом, теоретики осознали, что одно дополнительное пространственное измерение в теории струн (помимо оставшихся девяти пространственных и одного временного, обсуждавшихся в предыдущих главах) позволяет осуществить более чем удовлетворительный синтез всех пяти вариантов теории струн. Кроме того, это дополнительное измерение возникает не из воздуха: теоретики обнаружили, что выводы о существовании одного временного и девяти пространственных измерений, сделанные в 1970-х и 1980-х гг., являются приближенными, а точные вычисления показывают, что одно пространственное измерение в те годы осталось незамеченным.

Второе установленное свойство М-теории состоит в том, что она, кроме колеблющихся струн, включает и другие объекты: колеблющиеся двумерные мембраны и трехмерные капли (последние называют 3-бранами), а также и многие другие составляющие. Это свойство, как и одиннадцатое измерение, возникает вследствие отказа от приближений, использовавшихся до середины 1990-х гг. Если не считать этих и ряда других результатов, полученных в последние годы, М-теория остается мистической (этим объясняется одно из предложенных толкований буквы «М» в ее названии). Физики всего мира с большим энтузиазмом работают над тем, чтобы добиться полного понимания М-теории, и эта задача вполне может стать центральной проблемой физики XXI в.

Приближенный метод

Ограничения методов, с помощью которых физики пытались анализировать теорию струн, связаны с использованием теории возмущений. Теория возмущений – меткое название приближенной процедуры, в которой сначала пытаются найти грубый ответ, а затем поэтапно уточняют его с учетом все большего числа подробностей, опущенных на предыдущих этапах. Теория возмущений играет важную роль во многих областях науки; она являлась существенным элементом в понимания теории струн, и, как мы сейчас покажем, прочно входит в круг житейских явлений.

Предположим, что в один прекрасный день машина вашего знакомого начинает барахлить, и он обращается в мастерскую, чтобы ее проверить. Осмотрев машину, механик говорит, что дело плохо. Нужен новый блок двигателя, и обычно ремонт в таких случаях обходится примерно в $900 (включая стоимость деталей). Это примерная оценка, а более точная стоимость выяснится в ходе ремонта. Проходит несколько дней, и, проведя дополнительные проверки, механик сообщает более точную стоимость $950. Он объясняет, что необходим еще и новый регулятор: это увеличит общую стоимость ремонта примерно на $50. Наконец, когда машина отремонтирована, вашему знакомому выставляется счет на $987,93. В мастерской объясняют, что в него входят $950 за блок двигателя и регулятор, $27 за ремень вентилятора, $10 за кабель аккумулятора и $0,93 за изолированный болт. Примерная первоначальная стоимость $900 уточнялась с учетом все более мелких деталей. На языке физики эти детали рассматриваются как возмущения исходной оценки.

При правильном использовании теории возмущений первоначальная оценка будет достаточно близка к окончательному ответу, и после учета мелких подробностей, опущенных в исходной оценке, поправка будет невелика. Но иногда при оплате счета выясняется, что конечная сумма ужасающе расходится с начальной оценкой. И хотя в этот момент в голову, возможно, приходят совсем другие слова, в математике это называется неприменимостью теории возмущений. Это означает, что исходное приближение было плохим прогнозом окончательного ответа, потому что поправки привели не к относительно малым отклонениям, а к сильным изменениям приближенной оценки. Как указывалось в предыдущих главах, наше обсуждение теории струн до этого места опиралось на теорию возмущений, в определенном смысле аналогичную той, которую использовал механик. Упоминавшееся время от времени «недостаточное понимание» теории струн так или иначе связано с применением этого приближенного метода. Чтобы лучше понять смысл последнего утверждения, рассмотрим теорию возмущений в контексте, менее абстрактном, чем в теории струн, но все же более близком к этой теории, чем пример с механиком.

Классический пример теории возмущений

Классический пример использования теории возмущений дает изучение движения Земли в Солнечной системе. На таких больших пространственных масштабах можно учитывать только гравитационное взаимодействие, однако, если не делать дополнительных приближений, возникающие уравнения будут крайне сложны. Вспомним, что и по Ньютону, и по Эйнштейну все тела оказывают гравитационное воздействие на все другие тела, так что попытка точной формулировки сразу приводит к математически неразрешимой задаче о «гравитационном перетягивании каната» Землей, Солнцем, другими планетами и, если по-честному, всеми другими небесными телами. Как нетрудно сообразить, определить точное движение Земли с учетом всех влияний невозможно. На самом деле, уже в случае трех небесных тел уравнения становятся настолько сложными, что никто не сумел полностью решить их3'.

Тем не менее в рамках теории возмущений можно предсказать движение Земли в Солнечной системе с высочайшей точностью. Огромная масса Солнца по сравнению с массами всех других тел Солнечной системы, как и близость Солнца к Земле по сравнению с

расстояниями от Земли до других звезд, свидетельствуют о том, что Солнце оказывает доминирующее воздействие на движение Земли. Таким образом, в первом приближении можно учитывать только гравитационное воздействие Солнца. Для многих приложений этого вполне достаточно. Если окажется необходимым, можно уточнить это приближение, последовательно учитывая гравитационное воздействие следующих по степени влияния тел, например, Луны или тех планет, которые в данный момент проходят ближе всего к Земле. По мере того как паутина гравитационных взаимодействий будет становиться более запутанной, вычисления могут стать сложными, но это не должно затемнять смысл философии теории возмущений: гравитационное взаимодействие между Землей и Солнцем дает нам приближенное понимание движения Земли, а совокупность остальных гравитационных взаимодействий последовательно учитывается все уменьшающимися поправками. В этом примере подход в рамках теории возмущений применим, так как существует доминирующее физическое воздействие, допускающее сравнительно простое теоретическое описание. Это не всегда так. Например, если нужно рассчитать движение трех сравнимых по массе звезд, вращающихся в тройной системе одна вокруг другой, нельзя указать, взаимодействие каких звезд будет доминирующим. Поэтому нельзя дать грубую оценку, к которой затем можно было бы делать малые поправки, обусловленные другими эффектами. Если попытаться использовать теорию возмущений и выбрать для грубой оценки, например, взаимодействие между двумя звездами, быстро выяснится, что подход неприменим. Вычисленные «поправки» за счет влияния третьей звезды будут не малыми, а столь же существенными, что и первое грубое приближение. Ситуация знакомая: движения трех человек, танцующих танец «хора» мало напоминают движения пары, танцующей танго. Большие поправки означают, что исходное приближение было выстрелом мимо цели, а вся схема была карточным домиком. Важно понимать, что дело не просто в учете большой поправки третьей звезды. Здесь действует эффект домино: большая поправка сильно влияет на движение двух звезд, что, в свою очередь, сильно влияет на движение третьей звезды, которое опять-таки влияет на движение двух звезд, и т. д. Все нити гравитационной паутины одинаково важны, и должны рассматриваться одновременно. Единственным спасением в таких случаях часто бывает метод грубой силы – компьютерное моделирование совместного движения.

Этот пример демонстрирует, насколько при использовании теории возмущений важно определить, является ли предполагаемое первое приближение действительно приближением, и, если оно им является, сколько и каких более точных деталей следует учитывать, для достижения требуемой точности. Как мы сейчас обсудим, эти вопросы особенно важны при применении теории возмущений к изучению физических процессов в микромире.

Использование теории возмущений в теории струн

Физические процессы в теории струн порождаются фундаментальными взаимодействиями между колеблющимися струнами. Как обсуждалось в главе 6 *(читателям, пропустившим раздел «Более точный ответ» в главе 6, рекомендуется пролистать его начало.)* , в эти взаимодействия входят распады и слияния струнных петель, подобные тем, которые изображены на рис. 6.7 и продублированы для удобства читателя на рис. 12.3. Занимающиеся струнами теоретики показали, как схематическому изображению на рис. 12.3 поставить в соответствие точную математическую формулу, описывающую влияние каждой из сталкивающихся струн на движение другой. (Эта формула имеет разный вид в пяти теориях струн, но мы на время будем пренебрегать такими тонкостями.)

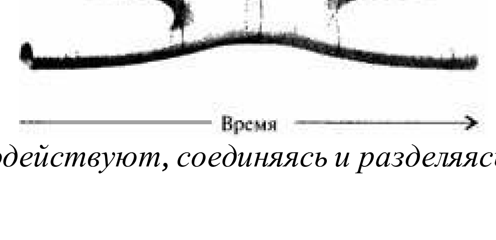

Рис. 12.3. Струны взаимодействуют, соединяясь и разделяясь.

Если бы не было квантовой теории, на этой формуле и заканчивалось бы изучение взаимодействия струн. Но в силу соотношения неопределенностей возникает микроскопический хаос, в котором происходит непрерывное рождение пар струна/антиструна (двух струн с противоположными колебательными модами) за счет одолженной у Вселенной энергии, и быстрая аннигиляция этих пар, в результате которой одолженная энергия возвращается Вселенной. Такие пары струн, рожденные из квантового хаоса, живущие за счет одолженной энергии и, следовательно, обязанные быстро слиться в одну петлю, называют парами виртуальных струн. И хотя их жизнь скоротечна, присутствие этих дополнительных пар виртуальных струн влияет на детальную структуру взаимодействия.

Схематически этот процесс изображен на рис. 12.4. Две исходные струны сливаются вместе в точке а, образуя единую петлю. Некоторое время эта петля движется, но в точке б квантовые флуктуации приводят к рождению виртуальной пары струн, которая далее аннигилирует в точке в, и в результате снова получается одна петля.

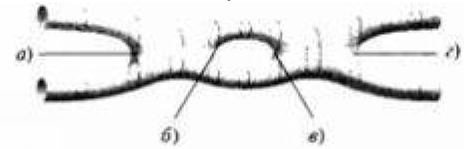

Рис. 12.4. Квантовый хаос приводит к рождению пары струна/антиструна (6) и ее уничтожению (в), что усложняет взаимодействие.

Наконец, в точке г эта струна отдает энергию, распадаясь на пару струн, которые разлетаются в разных направлениях. Из-за наличия одной петли в центре рис. 12.4 физики называют это «однопетлевым» процессом. Как и для взаимодействия, изображенного на рис. 12.3, для этой диаграммы можно выписать точную математическую формулу, в которой учитывается влияние рождения пары виртуальных струн на движение двух исходных.

Однако это еще не все: краткосрочные извержения виртуальных струн вследствие квантовых флуктуации могут произойти любое число раз, что приведет к рождению последовательных виртуальных пар. При этом получатся диаграммы с большим количеством петель, как показано на рис. 12.5.

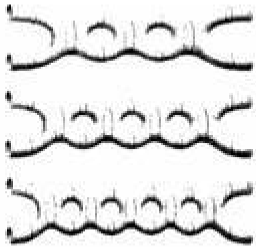

Рис. 12.5. Квантовый хаос может привести к рождению и уничтожению длинных последовательностей пар струна/антиструна.

Каждая диаграмма дает простой и удобный способ описания соответствующего физического процесса. Налетающие струны сливаются, квантовый хаос вызывает раздвоение получившейся петли на виртуальную пару, струны этой пары движутся, затем аннигилируют с образованием одной петли, которая далее снова распадается на виртуальную пару и т. д. Как и для других диаграмм, для каждого из этих процессов есть математические формулы, в которых учитывается влияние на движение исходной пары струн4).

Более того, аналогично примеру с механиком, определившим конечную стоимость ремонта сложением его исходной оценки $900 с последующими поправками $50, $27, $10 и $0,93, и аналогично уточнению описания движения Земли при добавлении к влиянию Солнца меньшего влияния Луны и других планет, теоретики показали, что взаимодействие двух струн можно вычислить путем сложения математических выражений для диаграмм без петель (без пар виртуальных струн), с одной петлей (одной парой виртуальный струн), с двумя петлями (двумя парами виртуальных струн) и т.д., как показано на рис. 12.6.

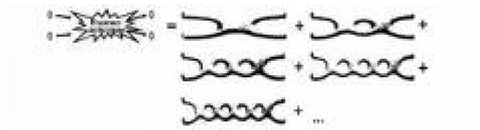

Рис. 12.6. Суммарное воздействие одной струны, налетающей на другую, есть результат сложения воздействий, включающих диаграммы с увеличивающимся числом петель.

В точном расчете требуется сложить математические выражения для всех этих диаграмм с растущим числом петель. Но так как диаграмм бесконечно много, а соответствующие математические вычисления с ростом числа петель усложняются, эта задача неразрешима. И здесь занимающиеся струнами теоретики берут на вооружение теорию возмущений, предполагая, что разумная грубая оценка дается процессом без петель, а диаграммы с петлями дают поправки, значения которых уменьшаются по мере увеличения числа петель.

В действительности, почти все, что мы знаем о теории струн, включая большую часть сведений из предыдущих глав, было открыто физиками при проведении подробных и тщательных вычислений по теории возмущений. Но чтобы удостовериться в точности полученных результатов, необходимо выяснить, являются ли грубые приближения, в которых учитывается только несколько первых диаграмм рис. 12.6, а все остальные диаграммы опущены, действительно хорошим приближением.

Приближает ли к ответу приближение?

Нельзя сказать заранее. Хотя математические формулы, соответствующие диаграммам, значительно усложняются при увеличении числа петель, теоретикам удалось установить одно очень важное свойство. Подобно тому, как вероятность разрыва каната на две части при сильном растяжении и раскачивании определяется его прочностью, вероятность распада струны с образованием виртуальной пары при квантовых флуктуациях также определяется некоторым параметром. Этот параметр называют константой связи

струны (как мы вскоре увидим, в каждой из пяти теорий струн своя константа связи). Это название довольно наглядно: значение константы связи струны определяет, насколько сильно квантовые колебания трех струн (исходной струны и двух виртуальных струн, на которые она распадается) зависят друг от друга, т. е. насколько сильно три струны связаны между собой. Вычисления показывают, что при больших значениях константы связи струны вероятность того, что квантовые флуктуации приведут к распаду струны (и ее последующему воссоединению), становится больше, а при малых значениях константы связи вероятность такого краткосрочного образования виртуальных струн мала.

Немного ниже мы обсудим вопрос об определении константы связи струны в каждой из пяти теорий, однако сначала необходимо уточнить, что означают слова «большая» и «малая» применительно к константе связи. Оказывается, что с точки зрения математического формализма теории струн границей между областями «больших» и «малых» констант связи является число 1. Это означает, что при константах связи, меньших 1, молниеносное вырывание большого числа пар виртуальных струн становится крайне маловероятным. Однако если константа связи больше или равна 1, то краткосрочное появление на сцене таких виртуальных пар становится весьма вероятным и увеличивается с увеличением константы связи струны5). В итоге, при константах связи струны, меньших 1, вклады диаграмм с петлями при увеличении числа петель уменьшаются. Это как раз то, что нужно для подхода с использованием теории возмущений: уменьшение вкладов говорит о том, что мы получим достаточно точные результаты, если будем пренебрегать всеми вкладами, кроме вкладов диаграмм, содержащих лишь несколько петель. Но если константа связи струны больше 1, то по мере увеличения числа петель старшие петлевые вклады становятся все более важными. Как и в случае тройной системы звезд, теория возмущений здесь неприменима. И первое приближение, которое дают диаграммы без петель, приближением

не является. (Все это в равной мере относится к каждой из пяти теорий струн, так как применимость приближенного подхода с использованием теории возмущений к любой заданной теории определяется значением константы связи.)

Поэтому возникает еще один важнейший вопрос: чему же равно значение константы связи (точнее, чему равны значения констант связи струны в каждой из пяти теорий струн)? Найти ответ до сих пор никому не удалось. Этот вопрос является одним из главных нерешенных вопросов в теории струн. Можно с уверенностью утверждать, что выводы, полученные в рамках теории возмущений, справедливы лишь в случае, если константа связи струны меньше единицы. Кроме того, точное значение константы связи струны непосредственно влияет на массы и заряды частиц, соответствующих ее различным колебательным модам. Таким образом, значение константы связи струны определяет большинство физических свойств теории. Сейчас мы подробнее обсудим причины того, почему на вопрос о значении константы связи во всех пяти теориях струн до сих пор нет ответа.

Уравнения теории струн

Как и для определения взаимодействия между струнами, для поиска фундаментальных уравнений теории струн может использоваться теория возмущений. На самом деле, эти уравнения определяют то, как струны взаимодействуют между собой, и, наоборот, способ взаимодействия струн определяет уравнения теории.

В каждой из пяти теорий струн существует уравнение, с помощью которого можно вычислить значение константы связи в этой теории. Однако к настоящему времени для всех пяти теорий физикам удалось найти лишь приближенный вид этого уравнения, полученный в рамках теории возмущений путем вычисления небольшого числа определенных диаграмм. И во всех пяти теориях приближенный вид уравнения говорит лишь о том, что если умножить значение константы связи на нуль, должен получиться нуль. Результат крайне удручающий, так как любое число при умножении на нуль дает нуль, и уравнению удовлетворяет любое значение константы связи струны. Поэтому во всех пяти теориях приближенные уравнения для определения константы связи не дают никакой информации о ее значении.

Кроме того, в каждой из пяти теорий струн должно существовать уравнение, с помощью которого в принципе можно определить точный вид как протяженных, так и свернутых пространственно-временных измерений. Известный на данный момент приближенный вид этого уравнения приводит к гораздо более жестким ограничениям, чем вид уравнения для константы связи, но допустимых решений все равно оказывается очень много. Например, допустимы решения с четырьмя протяженными и шестью свернутыми измерениями Калаби-Яу, но даже этим широким классом решений все они не исчерпываются: возможны и другие разбиения числа измерений на протяженные и свернутые6).

Что означают эти результаты? Возможны три ситуации. В первом, наихудшем случае даже при наличии уравнений для определения константы связи струны, а также уравнений для определения размерностей и точного вида пространства-времени (этим не может похвастаться ни одна теория), до сих пор не найденные точные уравнения могут допускать широкий спектр решений, что значительно ослабляет их предсказательную силу. Если это так, это будет крахом гипотезы о том, что теория струн способна объяснить свойства природы без необходимости экспериментального определения этих свойств и более или менее произвольной подгонки теории под эти свойства. Мы вернемся к анализу этого случая в главе 15. Во втором случае избыточная свобода выбора при решении приближенных уравнений теории струн может говорить об изъянах в нашей аргументации. Мы пытаемся использовать методы теории возмущений для определения значения самой константы связи струны. Но, как обсуждалось выше, методы теории возмущений имеют смысл лишь в случае,

если константа связи меньше 1, и поэтому возможно, что при таких расчетах делается неоправданное предположение о самом результате, а именно, что этот результат будет меньше 1. Наша неудача вполне может объясняться неправильностью исходной предпосылки: в любой из пяти теорий струн константа связи может быть больше 1. Наконец, в третьем случае нежелательный произвол в решениях может быть просто следствием того, что мы используем приближенные, а не точные уравнения. Например, даже если константа связи в данной теории струн меньше 1, уравнения теории могут быть чувствительны к вкладам всех диаграмм. То есть учет небольших поправок, соответствующих всем многопетлевым диаграммам, может быть важным для сведения приближенного уравнения, допускающего множество решений, к точному уравнению с ограниченным числом решений.

К началу 1990-х гг. анализ двух последних возможностей убедил большинство теоретиков в том, что повсеместное использование теории возмущений является помехой на пути прогресса. По мнению подавляющего большинства ученых, следующее серьезное продвижение возможно лишь при использовании подхода, не скованного приближенными методами и, следовательно, далеко выходящего за рамки теории возмущений. Еще в 1994 г. разработка такого подхода казалась несбыточной мечтой. Однако иногда и такие мечты сбываются.

Дуальность

Сотни занимающихся теорией струн теоретиков из многих стран мира ежегодно съезжаются на конференцию, посвященную обсуждению полученных за «отчетный» год результатов и оценке перспектив возможных направлений исследования. В зависимости от достигнутого в данном году прогресса обычно легко предугадать степень интереса и энтузиазм его участников. В середине 1980-х гг., в апогее первой революции в теории суперструн, на семинарах царила безграничная эйфория. Физиков окрыляла надежда на то, что скоро у них появится полное понимание теории струн, и она предстанет пред ними в качестве окончательной теории Вселенной. Сегодня это кажется наивным. Как выяснилось в следующие годы, для понимания многих глубоких и нетривиальных аспектов теории струн требуются длительные и напряженные исследования. После того как далеко не все сразу становилось на свои места, необоснованная первоначальная эйфория сменилась мертвым сезоном, а многие исследователи впали в уныние. Конференции по струнам, проводившиеся в конце 1980-х гг., отражали скрытое разочарование: физики представляли интересные результаты, но в атмосфере конференции не чувствовалось вдохновения. Некоторые даже предлагали отменить ежегодную конференцию. Однако в начале 1990-х годов ситуация стала исправляться. После ряда значительных прорывов (некоторые из них обсуждались в предыдущих главах) теория струн вновь стала набирать свою силу, и у многих исследователей опять появился энтузиазм и оптимизм. Тем не менее, трудно было предположить то, что произойдет на конференции по струнам, состоявшейся в марте 1995 г. в университете Южной Калифорнии.

Когда подошло время заявленного выступления Эдварда Виттена, он поднялся на кафедру и сделал доклад, который вызвал вторую революцию в теории суперструн. Вдохновленный результатами более ранних работ Даффа, Халла и Таунсенда, а также замечательными идеями Шварца, Ашока Сена и других теоретиков, Виттен объявил о новой стратегии выхода за рамки теории возмущений в теории струн. Главным элементом этой стратегии было понятие дуальности.

Физики используют это понятие для описания теоретических моделей, которые кажутся различными, но приводят к идентичным физическим следствиям. Есть «тривиальные» примеры дуальности, в которых совершенно одинаковые теории могут казаться различными лишь вследствие того, как эти теории представлены. Человек, понимающий только английский язык, не поймет, что речь идет о теории относительности, если объяснять ему эту теорию на китайском языке. Однако физик, свободно владеющий

обоими языками, легко переведет ее на свой язык и установит эквивалентность двух теорий. Мы называем этот пример «тривиальным», поскольку с точки зрения физики при переводе не обнаруживается ничего нового. Для владеющих разными языками теоретиков получить новый результат в теории относительности одинаково сложно вне зависимости от того, на каком языке эта теория сформулирована. Переход от английского к китайскому и обратно не приводит к появлению новых физических результатов.

Нетривиальными являются те примеры дуальности, в которых различные описания одной и той же ситуации приводят к различным взаимодополняющим физическим выводам и математическим методам исследования. На самом деле, выше мы уже дважды сталкивались с такими примерами. В главе 10 обсуждалось, что теория струн во вселенной с циклическим измерением радиусом R может быть с тем же успехом описана в рамках теории во вселенной с циклическим измерением радиусом 1/R. Геометрически два варианта различны, но физические явления оказываются совершенно идентичными. Второй пример – зеркальная симметрия. Имеются два различных многообразия Калаби-Яу в дополнительных шести пространственных измерениях, но две вселенные, кажущиеся на первый взгляд совершенно разными, имеют одни и те же физические свойства. Существенным отличием от перевода с одного языка на другой является то, что эти дуальные описания могут привести к новым физическим результатам, например, к предсказаниям минимального размера циклического измерения или переходов с изменением топологии в теории струн.

В своей лекции на конференции «Струны-95» Виттен привел пример нового и фундаментального типа дуальности. Как кратко отмечено в начале этой главы, он предположил, что пять теорий струн, имеющих совершенно разную структуру, на самом деле являются лишь разными способами описания одного и того же физического мира. Работая с пятью теориями струн, мы просто смотрели в пять разных окон, обращенных в сторону одного теоретического фундамента.

До событий середины 1990-х гг. возможность существования дуальности такого масштаба была одной из лелеемых физиками идей, о которой можно было упоминать лишь шепотом – настолько она представлялась фантастической. Если две теории существенно расходятся в деталях формулировки, трудно вообразить, что эти теории могут быть просто двумя разными описаниями одной и той же физической реальности, лежащей в основе. Тем не менее, с развитием теории струн появляются все более убедительные свидетельства в пользу того, что все пять теорий струн являются дуальными. Кроме того, как будет пояснено ниже, из доводов Виттена следует, что в физике есть место и для шестой теории.

Эти результаты тесно переплетены с вопросами о применимости методов теории возмущений, обсуждавшихся в конце предыдущего пункта. Причина в том, что пять теорий струн сильно отличаются друг от друга, если в каждой из них предполагается наличие слабой связи, т. е. если константа связи меньше 1. Долгое время физики опирались на теорию возмущений, в рамках которой невозможна постановка вопроса о том, какими будут свойства любой из теорий, если окажется, что константа связи в этой теории больше 1, т. е. связь будет сильной. По утверждениям Виттена и других исследователей, сейчас можно ответить на этот важнейший вопрос. Их результаты убедительно свидетельствуют о том, что для сильной связи в каждой из теорий (включая шестую теорию, которую мы опишем ниже) есть дуальное описание в терминах слабой связи в другой теории, и наоборот.

Чтобы яснее понять смысл последнего утверждения, можно взять на вооружение следующую аналогию. Представим себе двух, мягко говоря, слегка чудаковатых индивидуумов. Один из них обожает лед, но, как ни странно, никогда не видел воды. Второй обожает воду, но, что не менее странно, никогда не видел льда. Однажды они встречаются и решают отправиться в поход по пустыне. В начале похода каждый из них изумлен снаряжением другого. Любитель льда пленен гладкой поверхностью прозрачной жидкости, которую принес с собой любитель воды, а любителя воды странным образом притягивают твердые кубики, принесенные любителем льда. Ни один из них и не подозревает о близком родстве между льдом и водой; для них эти субстанции совершенно различны. Но,

продвигаясь по палящей жаре пустыни, они поражены тем, что лед начинает медленно превращаться в воду. А позже, дрожа от дикого холода пустынной ночи, они столь же сильно поражены тем, что жидкая вода начинает медленно превращаться в твердый лед. И тут до них доходит, что вода и лед, которые они считали совершенно разными веществами, тесно связаны между собой.

Дуальность в пяти теориях струн в чем-то похожа на этот пример: грубо говоря, константы связи струны играют роль, аналогичную температуре в пустыне. Подобно воде и льду, любые две из пяти теорий с первого взгляда кажутся совершенно различными. Но при изменении соответствующих констант связи эти теории превращаются одна в другую. Так же, как лед превращается в воду при увеличении температуры, одна из теорий переходит в другую при увеличении константы связи. Эта аналогия, в конце концов, может привести нас к выводу о том, что все теории струн являются дуальными описаниями единой структуры – аналога H2O для воды и льда.

Аргументация в пользу такого вывода почти целиком основана на принципах симметрии. Обсудим эти принципы.

Мощь симметрии

Никто и никогда даже не пытался изучить свойства любой из пяти теорий струн при больших значениях констант связи, потому что не было и намека на то, как поступать вне рамок теории возмущений. Однако в конце 1980-х – начале 1990-х гг. физики начали делать первые, но твердые шаги к описанию конкретных свойств теорий (в частности, к вычислению отдельных масс и зарядов), проявляющихся в области физики сильной связи для данной теории, но все же находящихся в пределах наших вычислительных возможностей. Такие вычисления, с необходимостью выходившие за рамки теории возмущений, сыграли главную роль во второй революции суперструн и стали возможными во многом благодаря соображениям симметрии.

Принципы симметрии дают мощные средства для изучения многих свойств реального мира. Мы уже упоминали о том, что хорошо подтверждающаяся уверенность в том, что законы физики не выделяют никакое конкретное место во Вселенной и никакой конкретный момент времени, позволяет нам предположить, что законы «здесь и сейчас» будут теми же самыми, что и «там и тогда». Это всеобъемлющий пример; но принципы симметрии могут с тем же успехом применяться в более скромных случаях. Например, если свидетель ограбления разглядел лишь правую половину лица преступника, в полиции его информация все равно окажется ценной для составления фоторобота. Симметрия тому причиной. Хотя правая и левая половина лица отличаются, большинство лиц достаточно симметричны для того, чтобы отраженный образ одной половины лица можно было бы с успехом использовать в качестве приближения для другой половины.

В каждом из разнообразных применений роль симметрии состоит в возможности восстановления свойств по косвенным признакам, что часто гораздо проще прямого подхода. Для изучения законов физики в созвездии Андромеды можно было бы направить туда экспедицию, найти подходящую планету у одной из звезд, построить там ускорители и проводить эксперименты, аналогичные экспериментам на Земле. Но косвенный подход с использованием симметрии при сдвиге места действия куда проще. Можно было бы в деталях ознакомиться с чертами левой половины лица грабителя, изловив преступника и отправив его в участок. Но часто гораздо проще сначала воспользоваться лево-правой симметрией человеческих лиц7).

Суперсимметрия принадлежит к более абстрактным типам симметрии, который связывает физические свойства элементарных объектов с различными спинами. Эксперимент дает лишь косвенные намеки на то, что в микромире реализуется такой механизм симметрии, но по описанным выше причинам физики твердо убеждены, что он действительно реализуется. Естественно, этот механизм является неотъемлемой частью теории струн. В

1990-е гг. после пионерской работы Натана Зайберга из Института перспективных исследований физики осознали, что суперсимметрия дает мощный инструмент, используя который можно косвенным методом ответить на ряд очень сложных и важных вопросов.

Одно то, что теория обладает суперсимметрией, позволяет даже без понимания всех тонкостей теории накладывать существенные ограничения на ее допустимые свойства. Приведем пример из лингвистики. Пусть известно, что в некоторой последовательности букв буква «у» встречается ровно три раза, и задача состоит в том, чтобы угадать эту последовательность. Не имея дополнительной информации, невозможно найти однозначное решение: подойдет любая последовательность с тремя буквами «у», например mvcfojziyxidqfqzyycdi и т. п. Но теперь допустим, что нам последовательно дают две подсказки: во-первых, ответ должен быть существующим английским словом, и, во-вторых, это слово должно содержать минимальное количество букв. Бесконечное количество первоначальных вариантов сокращается этими двумя подсказками сразу до одного кратчайшего английского слова с тремя «у»: syzygy (сизигия).

Суперсимметрия также дает подсказки, позволяющие конкретизировать ситуацию в теориях, которым свойственны такие принципы симметрии. Чтобы понять это, представьте, что вы столкнулись с физической задачей, аналогичной только что описанной задаче из лингвистики. Внутри черного ящика находится нечто неопознанное с определенным зарядом. Заряд может быть электрическим, магнитным, или иметь иную природу; для определенности примем, что этот заряд равен трем единицам электрического заряда. Без дополнительной информации определить содержимое ящика невозможно. В нем могут находиться три частицы с зарядом 1, подобные позитронам или протонам, или четыре частицы с зарядом 1 и одна частица с зарядом -1 (например, электрон), или девять частиц с зарядом 1/3 (например, и-кварки) плюс любое число незаряженных частиц (например, фотонов) и т. д. Подходит любая комбинация частиц с суммарным зарядом 3. Как и в лингвистической задаче, где единственным условием было наличие трех букв «у», число возможных вариантов содержимого черного ящика бесконечно.

Но теперь, как и в примере из лингвистики, предположим, что нам даны еще две подсказки: во-первых, теория, описывающая мир (а, следовательно, и содержимое черного ящика) является суперсимметричной, и, во-вторых, содержимое черного ящика должно иметь минимальную массу. Пользуясь результатами работ Е. Богомольного, Маноджа Прасада и Чарльза Соммерфилда, физики показали, что такая жесткая структура формализма (формализм суперсимметрии – аналог английского языка) и «условие минимальности» (минимальность массы с данным электрическим зарядом – аналог минимальной длины слова с данным числом букв «у») приводят к тому, что скрытое содержимое определяется однозначно. То есть требование минимальности массы содержимого черного ящика при условии, что заряд внутри него будет равен заданному, позволяет однозначно определить это содержимое. Состояния с данным значением заряда, в которых суммарная масса частиц минимальна, называют Б ПС-состояниями в честь трех открывших эти состояния ученых8).

Важность БПС-состояний состоит в том, что их свойства однозначно, легко и точно определяются без привлечения теории возмущений. Это справедливо вне зависимости от значения констант связи. Даже если константа связи струны велика, и, следовательно, подход с использованием теории возмущений неприменим, все равно можно вычислить точные параметры БПС-состояний. Эти параметры часто называют непертурбативными массами и зарядами, так как их значения вычислены вне рамок приближенного подхода по теории возмущений. Поэтому для читателя, владеющего английским языком, BPS можно расшифровать и как beyondperturbative states – состояния вне рамок теории возмущений.

БПС-свойства описывают лишь малую долю всех физических явлений в конкретной теории струн при больших константах связи, но эти состояния позволяют четко прояснить некоторые характеристики теории в области сильной связи. При выходе константы связи струны за рамки применимости теории возмущений, привязка к БПС-состояниям позволяет расширить границы нашего понимания теории. Как и знание лишь нескольких выборочных

слов в иностранном языке, эти состояния могут нам помочь продвинуться довольно далеко.

Дуальность в теории струн

Следуя Виттену, начнем с анализа одной из пяти теорий, например теории струн типа I, и предположим, что все ее девять пространственных измерений являются плоскими и несвернутыми. Такое предположение, разумеется, совершенно нереалистично, но оно делает анализ проще; случай свернутых измерений будет рассмотрен немного ниже. Примем сначала, что константа связи струны много меньше 1. В этом случае справедливы методы теории возмущений, и многие конкретные характеристики теории могут быть (и были) изучены довольно точно. Если мы будем увеличивать константу связи, но следить, чтобы она оставалась гораздо меньше 1, методы теории возмущений будут оставаться справедливыми. Однако конкретные характеристики теории несколько изменятся. Например, численные параметры рассеяния двух струн станут немного иными, так как изображенные на рис. 12.6 диаграммы с петлями при увеличении константы связи дадут большие вклады. Несмотря на эти изменения численных параметров, физическое содержание теории останется неизменным, если величина константы связи соответствует области применимости теории возмущений.

Когда значение константы связи струны типа I превысит единицу, методы теории возмущений станут неприменимыми, так что мы сфокусируем наше внимание на ограниченном наборе масс и зарядов БПС-состояний, которые мы еще будем в состоянии понять. Согласно гипотезе Виттена, подтвержденной затем в совместной работе с Джо Польчински из университета Санта Барбары, свойства теории струн типа I в области сильной связи в точности совпадут с известными свойствами теории О-гетеротической струны со слабой связью. Иными словами, если константа связи в теории струн типа I велика, конкретные массы и заряды, которые мы умеем вычислять, в точности совпадут с массами и зарядами в теории О-гетеротической струны с малой константой связи. Это явно указывает на то, что две теории струн, которые, подобно воде и льду, сначала казались совершенно разными, в действительности дуальны друг другу. При этом появляется убедительный довод в пользу того, что физические процессы в теории струн типа I для больших констант связи идентичны физическим процессам в теории О-гетеротической струны для малых констант связи. Схожие соображения наталкивают на мысль, что справедливо и обратное. Физические процессы в теории струн типа I для малых констант связи идентичны физическим процессам в теории О-гетеротической струны для больших констант связи9). Несмотря на то, что при анализе приближенными методами теории возмущений две теории струн кажутся не связанными, при изменении констант связи происходит переход одной из них в другую, подобный взаимным превращениям воды и льда.

Этот существенно новый результат – возможность описания физических свойств одной теории в области сильной связи в рамках другой теории в области слабой связи – называют дуальностью сильной и слабой связи. Как и рассмотренные выше примеры дуальности, эта дуальность показывает, что две теории на самом деле не являются разными. Точнее, они дают различные описания одной и той же лежащей в их основе теории. В отличие от «тривиальной» дуальности английского и китайского языков, дуальность сильной и слабой связи дает мощный инструмент исследования теорий. Если константа связи в одной из двух теорий мала, можно анализировать физические свойства с помощью хорошо известных приемов теории возмущений. Однако если константа связи велика, и теория возмущений неприменима, можно перейти к дуальной теории и вернуться к методам теории возмущений. Переход позволяет использовать количественные методы применительно к ситуациям, анализ которых, как казалось ранее, выходит за рамки наших возможностей.

Строгое доказательство того, что физические процессы в теории струн типа I для малых констант связи идентичны физическим процессам в теории О-гетеротической струны для больших констант связи и обратно, является очень сложной и до сих пор не решенной

задачей. Одна из двух предположительно дуальных теорий не может быть исследована по теории возмущений, так как ее константа связи слишком велика. Это не позволяет провести прямой расчет многих физических характеристик теории. И именно этим объясняется мощный потенциал предполагаемой дуальности: если гипотеза дуальности верна, она дает новый инструмент исследования теории в области сильной связи. Нужно лишь использовать теорию возмущений для дуальной теории в области слабой связи.

Даже если нельзя доказать, что две теории дуальны, полное согласие результатов, которые можно получить строго, является неоспоримым свидетельством в пользу гипотезы дуальности сильной и слабой связи теории типа I и теории О-гетеротической струны. Эта гипотеза проходила проверку с использованием все более изощренных вычислительных методов, и неизменно находила свое подтверждение. Большинство теоретиков, занимающихся струнами, убеждены в справедливости гипотезы дуальности.

Тем же самым методом можно изучить свойства других теорий струн, например, типа IIB. Согласно первоначальному предположению Халла и Таунсенда, которое затем было подтверждено исследованиями ряда физиков, в этой теории происходит нечто столь же необычное. При увеличении константы связи те физические свойства, которые еще можно определить, начинают совпадать со свойствами той же теории струн типа ПВ в области слабой связи. Другими словами, теория струн типа ПВ является самодуальной10). Тщательный анализ показывает, что теория струн типа ПВ с константой связи, большей 1, совершенно идентична той же теории струн с константой связи, обратной изначальной (и, следовательно, меньшей 1). Ситуация аналогична рассмотренному выше стягиванию циклического измерения до планковской длины: если уменьшать значение константы связи в теории типа ПВ до значения, меньшего 1, то вследствие самодуальности мы придем к эквивалентной теории типа ПВ с константой связи, большей 1.

Предварительные итоги

Итак, посмотрим, где мы находимся. К середине 1980-х гг. физики построили пять теорий суперструн. При исследовании приближенными методами теории возмущений свойства пяти теорий казались различными. Однако эти приближенные методы применимы лишь тогда, когда константа связи струны меньше 1. Ожидалось, что константу связи в каждой теории можно будет вычислить точно, но из вида приближенных уравнений для констант стало ясно, что такое вычисление в настоящее время невозможно. Поэтому физики направили свои усилия на изучение всех пяти теорий в допустимых диапазонах соответствующих констант связи, как для констант, меньших 1, так и больших 1, т.е. при слабой и при сильной связи. Однако попытки определить свойства любой из этих теорий в области сильной связи на основе традиционных методов теории возмущений оказались тщетными.

В настоящее время физики научились рассчитывать определенные характеристики каждой теории струн в области сильной связи, используя мощный формализм суперсимметрии. Ко всеобщему изумлению всех теоретиков, свойства теории О-гетеротических струн в области сильной связи оказались идентичными свойствам теории струн типа 1 в области слабой связи, и наоборот. Более того, свойства теории струн типа IIB в области сильной связи оказались идентичными свойствам той же теории в области слабой связи. Эти неожиданные открытия побуждают нас, следуя Виттену, перейти к анализу двух оставшихся теорий струн, струн типа IIA и Е-гетеротической струны, и выяснить, как эти теории вписываются в общую картину. И здесь нас ожидают еще более удивительные неожиданности. Для того чтобы подготовиться к ним, необходимо совершить краткий исторический экскурс.

Супергравитация

В конце 1970-х – начале 1980-х гг., до всплеска бурного интереса к теории струн, многие физики-теоретики пытались объединить квантовую теорию, гравитацию и другие взаимодействия в формализме единой теории поля для точечных частиц. Они надеялись, что препятствия, возникающие при попытках объединить теории точечных частиц, включающие квантовую механику и гравитацию, будут устранены при исследовании теорий с высокой степенью симметрии. В 1976 г. сотрудники Нью-йоркского университета Стони Брук Дэниел Фридман, Серджо Феррара и Питер ван Ньювенхейзен обнаружили, что наиболее многообещающими являются теории на основе суперсимметрии, так как в них сокращения многих квантовых флуктуаций бозонов и фермионов помогают умиротворить хаос на микроскопических масштабах. В своей работе эти ученые дали название супергравитация суперсимметричным квантовым теориям, которые разрабатывались с целью включить общую теорию относительности в единый формализм. Попытки разработать такие теории не увенчались успехом. Тем не менее, как отмечено в главе 8, урок, предвосхитивший развитие теории струн, не прошел даром.

Урок, смысл которого, вероятно, стал более ясен после работы сотрудников Парижской высшей технической школы Юджина Креммера, Бернара Джулиа и Шерка (1978 г.) состоял в том, что успешнее остальных оказались попытки построить теории супергравитации не в четырех, а в большем числе измерений. А именно, наиболее перспективными оказались варианты теорий в десяти или одиннадцати измерениях, при этом число одиннадцать оказалось максимально возможным числом измерений11). Связь с четырьмя наблюдаемыми измерениями в этих теориях также обеспечивалась путем использования формализма Калуцы-Клейна: лишние измерения сворачивались. В десятимерных теориях, как и в теории струн, сворачивалось шесть измерений, а в 11-мерной теории сворачивалось семь измерений.

Когда в 1984 г. теория струн увлекла многих физиков, виды на будущее у теорий супергравитации для точечных частиц резко ухудшились. Как уже неоднократно подчеркивалось, при точности, доступной сегодня и в обозримом будущем, струны выглядят, как точечные частицы. Это неформальное замечание можно сформулировать и в строгой форме: при изучении низкоэнергетических процессов в теории струн, т. е. процессов, в которых энергии недостаточно велики для того, чтобы прощупать протяженную ультрамикроскопическую структуру струны, можно аппроксимировать струну бесструктурной точечной частицей в формализме квантовой теории поля. Для процессов на малых расстояниях или процессов при больших энергиях такое приближение не подходит, так как мы знаем, что протяженность струны является важнейшим свойством, позволяющим разрешить конфликты между общей теорией относительности и квантовой теорией, которые теория точечных частиц разрешить не в состоянии. Однако при достаточно низких энергиях или на достаточно больших расстояниях эти проблемы не возникают, и такое приближение часто делается для удобства вычислений.

Примечательно, что квантовой теорией поля, дающей наилучшее приближение теории струн в указанном смысле, является десятимерная теория супергравитации. Особые свойства этой теории, обнаруженные в 1970-х и 1980-х гг., теперь находят свое объяснение: они являются низкоэнергетическими отголосками свойств теории струн. Исследователи, изучавшие десятимерную супергравитацию, обнаружили лишь вершину огромного айсберга конструкции теории суперструн. В действительности оказывается, что существуют четыре различных теории десятимерной супергравитации, и эти теории отличаются в деталях конкретной реализации суперсимметрии. Три из них являются низкоэнергетическими приближениями струн типа ПА, типа ИВ и Е-гетеротических струн точечными частицами. Четвертая теория является низкоэнергетическим пределом как струн типа I, так и О-гетеротических струн; в ретроспективе, этот факт был первым указанием на близость двух последних теорий.

Схема выглядит безупречной, вот только 11-мерная супергравитация осталась не у дел. В теории струн, которая формулируется в десяти измерениях, кажется, нет места для 11-мерной теории. На протяжении нескольких лет большинство физиков за редким

исключением рассматривали 11-мерную супергравитацию в качестве математического курьеза, не имеющего никакого отношения к физике теории струн12).

Проблески М-теории

Сегодня точка зрения радикально изменилась. На конференции «Струны-95» Виттен сделал следующее утверждение: если взять теорию струн типа IIA с константой связи, много меньшей 1, и увеличивать константу связи до значения, много большего 1, то физические свойства, которые мы еще способны анализировать (по существу, свойства насыщенных БПС-состояний), в низкоэнергетическом пределе будут соответствовать свойствам 11-мерной супергравитации.

Когда Виттен объявил о своем открытии, все присутствовавшие в аудитории потеряли дар речи, а позже весть об этом открытии громом пронеслась по всем институтам, где занимаются теорией струн. Почти для всех специалистов в этой области результат был полной неожиданностью. Первая реакция читателя этой книги, возможно, тоже будет напоминать реакцию большинства экспертов: какое отношение может иметь теория, характерная для одиннадцати измерений, к другой теории в десяти измерениях?

Ответ несет в себе глубокий смысл. Чтобы понять его, нужно описать результат Виттена более точно. На самом деле, сначала проще обратиться к другому тесно связанному с этим результату, полученному чуть позже Виттеном и стажером Принстонского университета Петром Хофавой для теории Е-гетеротической струны. Для этой теории в области сильной связи ими также было найдено описание в терминах 11-мерной теории; это поясняется на рис. 12.7. Слева на этом рисунке схематически показана теория Е-гетеротической струны с константой связи, много меньшей 1. Эта область констант связи рассматривалась в предыдущих главах и изучалась теоретиками на протяжении более десяти лет. При переходе вправо на рис. 12.7 значение константы связи постепенно увеличивается. До 1995 г. теоретикам было известно, что при этом вклады петлевых диаграмм (см. рис. 12.6) будут становиться все более важными, и при дальнейшем увеличении константы связи весь формализм теории возмущений перестает быть справедливым. Но никто не мог даже вообразить того, что при увеличении константы связи проявится новое измерение! На рис. 12.7 это измерение соответствует вертикали. Нужно помнить, что двумерная сетка на рисунке, с которого мы начали обсуждение, представляет все девять пространственных измерений Е-гетеротической струны. Новое измерение по вертикали будет десятым пространственным, так что вместе с временным измерением в сумме получается одиннадцать пространственно-временных измерений.

Рис. 12.7. При увеличении константы связи Е-гетеротической струны появляется новое измерение, и сама струна вытягивается, принимая вид цилиндрической мембраны.

Кроме того, на рис. 12.7 иллюстрируется важнейшее следствие существования этого нового измерения. Структура Е-гетеротической струны меняется по мере роста этого измерения. При увеличении константы связи из одномерной петли она растягивается в ленту, а затем – в деформированный цилиндр! Другими словами, Е-гетеротическая струна становится двумерной мембраной, ширина которой (протяженность по вертикали на рис. 12.7) определяется значением константы связи. Более десятилетия теоретики всегда использовали методы теории возмущений, основанные на предположении малости константы связи. Как показал Виттен, в этом предположении фундаментальные объекты микромира выглядят и ведут себя подобно струнам, даже если у них имеется скрытое второе пространственное измерение. Если отказаться от предположения о малости константы связи и рассмотреть физические характеристики Е-гетеротической струны при больших константах связи, второе измерение станет явным.

Это утверждение не обесценивает ни одного из выводов предыдущих глав, но побуждает рассмотреть их в рамках нового формализма. Возникает, например, вопрос, как

можно состыковать новые результаты с тем, что в теории струн требуется одно временное и девять пространственных измерений? Что же, как обсуждалось в главе 8, это ограничение возникает при расчете числа различных направлений, в которых может колебаться струна, и число измерений выбирается так, чтобы квантово-механические вероятности гарантированно имели осмысленные значения. Новое измерение не является измерением, в котором может колебаться Е-гетеротическая струна, так как оно зафиксировано в самой структуре «струны». Кроме того, в формализме теории возмущений, который использовался физиками для вывода ограничения на число пространственно-временных измерений, предполагалась, что константа связи Е-гетеротической струны мала. И хотя это было осознано гораздо позднее, в таком предположении неявно используются два взаимосогласованных приближения: малая ширина мембраны на рис. 12.7, при которой она выглядит, как струна, и малый размер одиннадцатого измерения, не влияющий на вид уравнений теории возмущений. В рамках этой приближенной схемы мы вынуждены представлять себе Вселенную десятимерной и заполненной одномерными струнами. Теперь мы видим, что она 11-мерная и заполнена двумерными мембранами.

По техническим причинам, впервые Виттен столкнулся с одиннадцатым измерением при исследовании сильной связи струны типа ПА, для которой ситуация вполне аналогична. Как и в случае Е-гетеротической струны, размер одиннадцатого измерения в случае струны типа ПА определяется значением ее константы связи. При увеличении этого значения новое измерение расширяется. По мере расширения, однако, струна типа ПА превращается в «велосипедную камеру» (см. рис. 12.8), а не в ленту, как в случае Е-гетеротической струны.

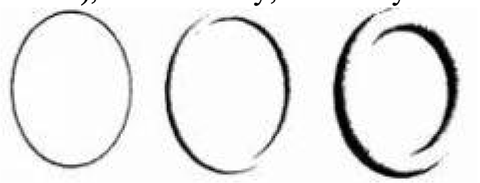

Рис. 12.8. По мере увеличения константы связи для струны типа НА струны расширяются, превращаясь из одномерных петель в двумерные объекты, похожие на велосипедную камеру.

И снова, согласно Виттену, традиционные представления физиков о струнах типа IIA как об одномерных объектах, имеющих длину, но не имеющих толщины, есть следствие использования ими формализма теории возмущений, в котором константа связи струны предполагается малой. Если законы природы требуют, чтобы константа связи действительно была малой, то это приближение оправдано. Однако результаты Виттена и других физиков, полученные в ходе второй революции в теории суперструн, убедительно свидетельствуют о том, что «струны» типа ПА и Е-гетеротические «струны» имеют фундаментальную структуру двумерных мембран, живущих в 11-мерной вселенной.

Но что представляет собой 11-мерная теория? Согласно Виттену и другим исследователям, при низких (по сравнению с планковской) энергиях она аппроксимируется почти позабытой всеми 11-мерной квантово-полевой теорией супергравитации. А как же тогда описать эту теорию при высоких энергиях? Сейчас этот вопрос тщательно исследуется. Как показано на рис. 12.7 и 12.8, в такой 11-мерной теории существуют двумерные протяженные объекты – двумерные мембраны. Как мы вскоре увидим, важную роль играют и протяженные объекты других размерностей. Однако об этой 11-мерной теории ничего не известно, кроме набора разнородных фактов. Являются ли мембраны ее фундаментальными объектами? Каковы ее определяющие свойства? Благодаря каким ее свойствам она может быть связана со знакомой нам физикой? Если соответствующие константы связи малы, то лучшие ответы, которые можно дать сейчас, уже описаны в предыдущих главах, так как при малых константах связи мы возвращаемся обратно к теории струн. Но для больших констант связи в настоящее время ответов не знает никто.

Для этой II-мерной теории, что бы она собой ни представляла, Виттен придумал рабочее название: М-теория. Все расшифровывают это название по-разному. Вот примеры: мистическая теория, материнская теория («мать всех теорий»), мембранная теория (так как

мембраны в любом случае играют в ней роль), матричная теория (после недавних работ Тома Бэнкса из университета Ратгерса, Вилли Фишлера из Техасского университета в Остине, Стивена Шенкера из университета Ратгерса, Сасскинда и других, предложивших новую интерпретацию теории). Однако и без точной расшифровки названия или знания ее свойств уже сейчас ясно, что М-теория дает основу для объединения всех пяти теорий струн.

М-теория и паутина взаимосвязей

Есть старая притча о трех слепцах и слоне. Первый слепец ощупывает бивень слона и говорит, что чувствует что-то гладкое и твердое. Второй держится за ногу и описывает что-то шероховатое и мускулистое. Третий слепец держит слона за хвост и говорит о чем-то гибком и хилом. Слыша описания других слепцов, каждый из них думает, что держится за другое животное. Много лет физики были столь же слепы и думали, что разные теории струн действительно являются разными. Но теперь, благодаря второй революции в теории суперструн, наступило прозрение, и они поняли, что все пять теорий струн являются частями тела одного огромного «слона» – М-теории.

В этой главе мы обсудили, как изменилось наше понимание теории струн при выходе за рамки теории возмущений, неявно использовавшейся в предыдущих главах. На рис. 12.9 подведен итог тем взаимосвязям, которые обсуждались до этого момента. Стрелками на этом рисунке обозначены дуальные теории. Видно, что мы имеем паутину взаимосвязей, но она соткана еще не полностью.

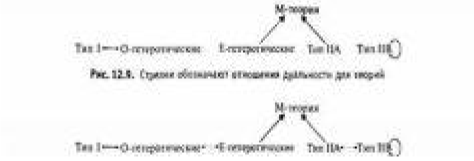

Рис. 12.10. С учетом дуальностей, включающих геометрию пространства-времени (как в главе 10) все пять теорий вместе с М-теорией связываются воедино паутиной дуальностей.

Включая дуальности из главы 10, можно довести дело до конца. Вспомним о дуальности, возникающей при замене радиуса циклического измерения R на радиус 1/jR. Выше мы слегка сгладили один аспект этой дуальности, но теперь его нужно рассмотреть подробнее. В главе 10 обсуждались свойства струн во вселенной с одним циклическим измерением; при этом не указывалось конкретно, с какой из пяти теорий струн мы работаем. Как утверждалось, взаимная замена колебательных мод струны на топологические позволяет переформулировать описание (в рамках теории струн) вселенной с циклическим измерением радиуса 1/jR в терминах вселенной с циклическим измерением радиуса R. Факт, который был нами опущен, состоит в том, что теории струн типов ПА и ПВ, а также теории Е– и О-гетеротических струн в действительности не переходят сами в себя, а меняются местами при замене радиусов. Поэтому применительно к этим теориям точная формулировка дуальности при замене радиусов такова: законы физики в теории струн типа ПА во вселенной с циклическим измерением радиуса R идентичны законам физики в теории струн ПВ во вселенной с циклическим измерением радиуса 1/R. Аналогичное утверждение справедливо для теорий Е-и О-гетеротических струн. На выводах главы 10 такая формулировка не отражалась, но в данном обсуждении она играет важную роль.

Дело в том, что с учетом дуальности при замене радиусов в теориях струн типов IIA и II В, а также с учетом той же дуальности для теорий О– и Е-гетеротических струн можно достроить до конца паутину взаимосвязей, как показано на рис. 12.10 пунктирными линиями. Видно, что все пять теорий, а также М-теория, дуальны друг другу. Все они скреплены в единую теоретическую конструкцию и дают пять разных подходов для описания одной и той же физики, лежащей в основе этой формулировки. Для различных приложений может быть более удобным язык той или иной теории. Например, с теорией О-гетеротических струн в случае слабой связи работать гораздо удобнее, чем с теорией струн типа I в случае сильной

связи. Тем не менее эти теории описывают одни и те же физические явления.

Общая панорама

Теперь становятся более понятными рис. 12.1 и 12.2, приведенные в начале этой главы для иллюстрации важнейших черт теории. Как видно из рис. 12.1, до 1995 г., в отсутствие каких-либо сведений о дуальности, было пять не связанных между собой теорий. Над каждой из них работало много физиков, но без привлечения аргументов о дуальных свойствах эти теории казались различными.

У каждой теории был свой набор характеристик: своя константа связи, геометрическая структура, радиусы свернутых измерений и т.д. Физики надеялись (и продолжают надеяться) на то, что фундаментальные свойства должны определяться в рамках самой теории. Однако, не имея возможности определить их при помощи известных приближенных уравнений, теоретики, естественно, начали исследовать физические свойства во всех возможных диапазонах. Это показано на рис. 12.1, где каждая точка затушеванной области соответствует конкретному выбору константы связи и геометрии свернутых измерений. Без учета дуальности при этом все равно оставалось пять несвязанных (наборов) теорий.

Но сейчас, когда рассмотренные выше дуальности учтены, при изменении констант связи и геометрии можно переходить от одной теории к другой, если при этом включить в анализ и объединяющую их центральную область – М-теорию (рис. 12.2). И хотя наши познания в области М-теории очень скудны, приведенные косвенные соображения дают веские аргументы в пользу того, что М-теория является основой объединения пяти на первый взгляд различных теорий струн. Более того, выясняется, что М-теория тесно связана с шестой теорией – 11-мерной супергравитацией. Это отражено на рис. 12.11, более точном варианте рис. 12.213).

Как показано на рис. 12.11, несмотря на то, что сегодня фундаментальные идеи и уравнения М-теории еще мало исследованы, они объединяют все формулировки теории струн.

Рис. 12.11. С учетом дуальностей все пять теорий струн, 11-мерная супергравитация и М-теория сливаются вместе в единую схему.

Могущественная М-теория указала физикам дорогу к новой и гораздо более глубокой единой формулировке.

Сюрприз в М-теории: демократия в протяжении

Когда на территории одного из пяти полуостровов на теоретической карте рис. 12.11 константа связи струны мала, фундаментальный объект в этой теории выглядит как одномерная струна. Сейчас, однако, у нас появилась новая точка зрения. Если начать двигаться из области Е-гетеротических струн или струн типа НА, увеличивая значения соответствующих констант связи, то постепенно мы сместимся к центру карты рис. 12.11, и объекты, казавшиеся одномерными струнами, начнут вытягиваться, превращаясь в двумерные мембраны. Более того, в результате более сложной последовательности

преобразований дуальности, включающих как изменения констант связи струн, так и изменения вида свернутых измерений, можно беспрепятственно перейти из любой точки на рис. 12.11 к любой другой ее точке. А так как двумерные мембраны, которые мы открыли, рассматривая Е-гетеротические струны и струны типа ПА, нам будут сопутствовать при переходе к любой из трех других формулировок, мы приходим к выводу, что двумерные мембраны на самом деле присущи любой из пяти формулировок теорий струн.

Возникают два вопроса. Во-первых, являются ли двумерные мембраны подлинно фундаментальными объектами теории струн? Во-вторых, если вспомнить о смелом рывке от нульмерных точечных частиц к одномерным струнам в 1970-х и начале 1980-х гг. и учесть только что обсужденные результаты о существовании двумерных мембран в теории струн, возможно ли, что в теории присутствуют объекты старших размерностей? На момент написания этой книги точные ответы еще не известны, но ситуация, похоже, следующая.

Чтобы разобраться в каждой из формулировок теории струн, не прибегая к теории возмущений, теоретики во многом опирались на принципы суперсимметрии. В частности, характеристики БПС-состояний, массы и заряды частиц в этих состояниях, однозначно определяются суперсимметрией, и это позволило понять некоторые свойства теории в области сильной связи без необходимости проведения прямых вычислений невообразимой сложности. На самом деле, благодаря пионерским работам Хоровица и Строминджера, а также последующей замечательной работе Польчински, о БПС-состояниях мы знаем даже больше. В частности, нам не только известны их заряды и массы, но имеется ясное представление о том, как эти состояния выглядят. И последнее, возможно, самое удивительное. Некоторые из БПС-состояний – одномерные струны. Другие представляют собой двумерные мембраны. Пока все действующие лица знакомы. И вот – сюрприз: некоторые состояния трехмерны, четырехмерны,… На самом деле диапазон возможных пространственных размерностей включает все значения до девяти включительно. Теория струн или теория, которую сейчас называют М-теорией (какое бы окончательное название ей ни дали), в действительности содержит протяженные объекты целого ряда пространственных измерений. Протяженные трехмерные объекты физики назвали 3-бранами, протяженные четырехмерные – 4-бранами, и так далее до 9-бран (в общем случае для протяженного объекта, имеющего р пространственных измерений, физики придумали не очень благозвучный термин р-брана). Иногда, используя эту терминологию, струны называют 1-бранами, а мембраны – 2-бранами. Тот факт, что все эти протяженные объекты являются равноправными объектами теории, побудил Пола Таунсенда провозгласить «демократию бран».

Несмотря на «демократию бран», струны, т.е. протяженные одномерные объекты, все-таки уникальны по следующей причине. Физики показали, что массы протяженных объектов любой размерности, кроме одномерных струн, обратно пропорциональны значению соответствующей константы связи струны, если мы работаем в рамках любой из пяти теорий струн на рис. 12.11. Это означает, что в пределе слабой связи во всех пяти формулировках все объекты, кроме струн, будут иметь огромные массы, на порядки превышающие планковскую. Поэтому из формулы Е = тс2 следует, что для их рождения потребуются огромные энергии, и они будут оказывать ничтожное влияние на законы физики (но не на все, как будет показано в следующей главе). Однако если двигаться вглубь от полуостровных областей на рис. 12.11, то браны старших размерностей станут легче, и будут играть все более важную роль14).

Таким образом, следует представлять себе такую картину: в центральной области на рис. 12.11 фундаментальными объектами теории являются не только струны и мембраны, а «браны» различных размерностей, и все они более или менее равноправны. Сейчас у нас нет ясного понимания многих свойств этой богатой теории. Одно мы знаем твердо: при движении от центральной области в сторону любого из полуостровов только струны или свернутые мембраны в обличье струн (рис. 12.7 и 12.8) оказываются достаточно легкими, чтобы сохраниться и привести к известной нам физике – частицам из табл. 1.1 и четырем

типам взаимодействий. Подход теории возмущений, который физики использовали почти два десятилетия, был недостаточно гибок для того, чтобы выявить существование протяженных объектов огромной массы и других размерностей. Центральным объектом анализа были струны, и теория получила далеко не демократическое название теории струн. Отметим еще раз, что в этих областях рис. 12.11 для большинства исследований можно с полным основанием пренебречь всеми объектами, кроме струн. По существу, в предыдущих главах этой книги мы так и поступали. Однако сейчас мы видим, что теория оказалась в действительности богаче, чем кто-либо ранее предполагал.

Помогает ли это в неразрешенных вопросах теории струн?

И да, и нет. Нам удалось достичь более глубокого понимания, освободившись от некоторых выводов, которые, как стало ясно теперь, были следствиями использования теории возмущений, а не истинных принципов теории струн. Однако в настоящее время методы, позволяющие работать вне рамок теории возмущений, весьма ограничены. Открытие замечательной системы дуальных связей позволяет глубже постичь теорию струн, но многие вопросы остаются неразрешенными. Например, мы еще не знаем, как выйти за рамки приближенных уравнений для определения значения константы связи струны. Как обсуждалось выше, эти уравнения слишком грубые, чтобы из них можно было извлечь хоть какую-то полезную информацию. Нет у нас и существенных продвижений по вопросам о том, почему протяженных пространственных измерений именно три или каким должен быть точный вид многообразия для свернутых измерений. Для ответа на эти вопросы нужны более отточенные инструменты исследований вне рамок теории возмущений, чем те, которыми мы сегодня обладаем.

То, что действительно появилось, – это гораздо более глубокое понимание логической структуры и исследовательского диапазона теории струн. До открытий, итог которым подведен на рис. 12.11, поведение каждой теории струн в области сильной связи было полной загадкой. Как на средневековых картах, царство сильной связи было белым пятном, на которое, сообразно фантазии картографа, наносились изображения драконов и морских чудовищ. Но сейчас мы видим, что хотя путешествие в это царство может завести нас в неизведанные просторы М-теории, в конце концов мы снова выйдем в курортную зону слабой связи, где говорят на дуальном языке другой теории струн, ранее считавшейся совершенно непохожей.

Дуальность и М-теория объединяют пять теорий струн, подталкивая к важному выводу. Может оказаться и так, что нас больше не поджидают удивительные открытия, сравнимые с описанными выше. Как только картограф обозначил все точки на глобусе Земли, глобус готов, и география исчерпана. Это не означает, что разведка местности в Антарктиде или на необитаемых островах в Микронезии лишены всякой научной или культурной ценности. Это означает лишь, что век географических открытий подошел к концу. И свидетельством тому – отсутствие белых пятен на карте. «Теоретическая карта» на рис. 12.11 имеет для теоретиков, занимающихся струнами, такое же значение. Она покрывает все сферы теории, в которые можно попасть, отправляясь из области любой из пяти формулировок струн. И хотя нам далеко до полного понимания неизведанной М-теории, на карте нет белых пятен. Как и картограф, теоретик может теперь со сдержанным оптимизмом заявить, что весь спектр логически обоснованных теорий, вбирающих в себя все важные открытия прошлого века – специальную и общую теории относительности, квантовую механику, калибровочные теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, суперсимметрию, дополнительные измерения Калуцы и Клейна, – уже нанесен на карту рис. 12.11.

Задача струнного теоретика (возможно, его уже нужно называть М-теоретиком) – показать, что некая точка на теоретической карте рис. 12.11 действительно описывает нашу Вселенную. Чтобы осуществить это, нужно найти исчерпывающие и точные уравнения, решения которых позволили бы поймать эту неуловимую точку на карте, а затем добиться

понимания соответствующих физических явлений, достаточного для сравнения с экспериментом. По словам Вит-тена, «понимание того, чем в действительности является М-теория, т. е. какую физику она несет в себе, повлияет на наше понимание природы не менее сильно, чем любое из главных научных потрясений прошлого»15). В этом суть программы построения объединенной теории в XXI в

Глава 13. Черные дыры с точки зрения теории струн и М-теории

Противоречия между общей теорией относительности и квантовой теорией, существовавшие до эры теории струн, были оскорблением наших врожденных эстетических представлений о том, что законы природы должны складываться в безупречно стройную и целостную систему. Но суть этих противоречий не сводилась к вопиющему несоответствию абстрактных принципов. Существовавшие в момент Большого взрыва и существующие сейчас внутри черных дыр экстремальные физические условия нельзя объяснить без помощи квантовой формулировки гравитационного взаимодействия. С появлением теории струн появилась и надежда устранить глубокий антагонизм между квантовой теорией и гравитацией. В этой и следующей главах мы опишем, насколько далеко удалось продвинуться физикам в понимании черных дыр и проблемы происхождения Вселенной.

Черные дыры и элементарные частицы

С первого взгляда трудно себе представить два более разобщенных понятия, чем черные дыры и элементарные частицы. Обычно мы представляем себе черные дыры самыми ненасытными из небесных тел, а элементарные частицы – самыми незаметными частицами материи. Однако исследования конца 1960-х и начала 1970-х гг., включая работы Деметриоса Христодулу, Вернера Израэля, Ричарда Прайса, Брендона Картера, Роя Керра, Дэвида Робинсона, Хокинга и Пенроуза, показали, что, возможно, черные дыры и элементарные частицы не так уж и различны, как это может показаться. Эти физики обнаружили весьма веские свидетельства в пользу того, что Джон Уилер суммировал фразой: «У черных дыр нет волос». Уилер имел в виду, что за вычетом небольшого числа отличительных особенностей все черные дыры выглядят одинаково. Какие же это отличительные особенности? Первая, конечно, это масса черной дыры. А остальные? Исследования показали, что ими являются электрический заряд и некоторые другие возможные заряды, а также ее скорость вращения. И это все. Любые две черные дыры с одинаковыми массами, зарядами и спинами совершенно идентичны. У черных дыр нет модных «причесок», т. е. других присущих им свойств, по которым одну из них можно было бы отличить от другой. Для физика этот факт – удары в набат. Вспомним, что именно этими свойствами – массой, зарядом и спином – отличаются друг от друга элементарные частицы. Схожесть определяющих характеристик неоднократно приводила некоторых физиков к мысли о том, что черные дыры, в действительности, могут быть гигантскими элементарными частицами.

Действительно, в теории Эйнштейна не существует ограничений на минимальную массу черной дыры. Согласно теории относительности, если сжать кусок вещества любой массы до достаточно малых размеров, то он превратится в черную дыру (чем меньше масса, тем сильнее его нужно сдавливать). Можно придумать мысленный эксперимент, в котором берутся сгустки материи все меньшей массы, эти сгустки сжимаются до черных дыр все меньших размеров и свойства таких черных дыр сравниваются со свойствами элементарных частиц. Из утверждения Уилера об отсутствии волос можно еделать вывод о том, что образованные таким способом черные дыры будут очень похожи на элементарные частицы. И те и другие выглядят как мельчайшие сгустки материи, полностью характеризующиеся массами, зарядами и спинами.

Однако есть небольшая загвоздка. Черные дыры во Вселенной, массы которых во

много раз больше массы Солнца, так велики и тяжелы, что для описания их свойств не нужна квантовая механика, и вполне достаточно уравнений общей теории относительности. (Здесь обсуждается общая структура черной дыры, а не область сингулярности внутри нее. Ввиду крошечных размеров этой области, здесь, несомненно, потребуется квантово-механическое описание.) Но размеры черных дыр уменьшаются по мере уменьшения их масс в нашем мысленном эксперименте, и в какой-то момент квантовая механика начинает играть роль. Это происходит, когда масса черной дыры становится порядка планковской. (С точки зрения физики элементарных частиц планковская масса велика и равна примерно 1019 массы протона, но с точки зрения физики черных дыр эта масса крайне мала.) Поэтому физики, рассуждавшие о возможном близком родстве между элементарными частицами и черными дырами, сразу же натыкались на несовместимость квантовой теории с теорией относительности, лежащей в основе описания черных дыр. В прошлом эта несовместимость парализовала продвижение теоретиков в таком захватывающе интересном направлении.

Позволяет ли теория струн продвигаться вперед?

Да. Совершенно неожиданный и весьма утонченный подход к изучению черных дыр в рамках теории струн начинает давать первые теоретические обоснования взаимосвязи между черными дырами и элементарными частицами. Дорога к установлению этой взаимосвязи не всегда прямая, но она проходит по просторам ярких открытий в теории струн, и путешествие по ней не будет скучным.

В качестве отправной точки рассмотрим похоже совсем несвязанный вопрос, который теоретики долбили со всех сторон с конца 1980-х гг. Математикам и физикам было давно известно, что при свертывании шести пространственных измерений в многообразие Калаби-Яу существует два типа сфер, вложенных в структуру пространства. Сферы первого типа двумерные и похожи на поверхность надувного мяча. Они играли большую роль в обсуждении флоп-перестроек с разрывом пространства в главе 11. Другие сферы представить сложнее, но они встречаются столь же часто. Это трехмерные сферы, подобные поверхностям надувных мячей, в которые играют на песчаных океанских пляжах во вселенной с четырьмя протяженными пространственными измерениями. Обычный же надувной мяч, естественно, является трехмерным, и только его поверхность, как и поверхность Садового шланга, имеет два измерения. Любую точку на этой поверхности можно задать с помощью двух координат, например широты и долготы. Но сейчас мы хотим представить себе еще одно измерение, так что мяч окажется четырехмерным, а его поверхность – трехмерной. А так как представить это визуально почти невозможно, мы, как правило, будем прибегать к наглядной аналогии в случае меньшего числа измерений. Однако, как мы сейчас увидим, одна черта трехмерной природы сферических поверхностей имеет важнейшее значение.

Изучая уравнения теории струн, физики осознали возможность и даже высокую вероятность того, что в процессе эволюции во времени эти трехмерные сферы могут стягиваться, коллапсировать до исчезающе малых размеров. Но что произойдет, задавались вопросом физики, если и структура пространства будет стягиваться аналогичным образом? Не приведет ли такое сжатие пространства к каким-нибудь катастрофическим эффектам? Подобный вопрос уже ставился и был решен нами в главе 11, но там рассматривался только коллапс двумерных сфер, а сейчас наше внимание сосредоточено на изучении трехмерных сфер. (Так же, как и в главе 11, поскольку стягивается лишь часть многообразия Калаби-Яу, а не все пространство, то аргументы главы 10, позволяющие отождествить малые и большие радиусы, неприменимы.) И вот в чем состоит качественное отличие, связанное с изменением числа измерений1). Как описывалось в главе 11, важнейшим свойством движущихся струн является их способность экранировать двумерные сферы. Иными словами, двумерная мировая поверхность струны может целиком окружить двумерную сферу, как показано на рис. 11.6. Этого оказывается достаточно для защиты от катастрофических последствий,

возможных при коллапсе двумерной сферы. Но сейчас мы рассматриваем другой тип сфер в пространстве Калаби-Яу, и у этих сфер слишком много измерений, чтобы движущаяся струна могла их окружить. Если понимание последнего утверждения вызывает у читателя сложности, можно без проблем рассмотреть аналогию с числом размерностей на единицу меньше. Трехмерные сферы можно представлять себе в виде двумерных поверхностей надувного мяча, если при этом одномерные струны рассматривать в качестве нульмерных точечных частиц. Ясно, что нульмерная точечная частица не сможет окружить двумерную сферу, поэтому одномерная струна не сможет опоясать трехмерную сферу.

Подобные рассуждения привели теоретиков к выводу, что при коллапсе трехмерной сферы внутри пространства Калаби-Яу (который вполне допускается приближенными уравнениями, если вообще не является рядовым явлением в теории струн) возможны катастрофические последствия. Действительно, из известных к середине 1990-х гг. приближенных уравнений теории струн, казалось бы, следовало, что если такой коллапс случится. Вселенной придет конец: некоторые расходимости, которые сокращаются в теории струн, в случае подобного перетягивания структуры пространства перестанут сокращаться. Несколько лет физикам приходилось мириться с этим неприятным, хотя и не окончательно установленным фактом. Но в 1995 г. Эндрю Строминджер показал, что подобные предсказания неверны, и конец света еще далек.

Строминджер, следуя более ранней потрясающей работе Виттена и Зайберга, опирался на то, что теория струн в свете новых открытий, сделанных во время второй революции в теории суперструн, не есть лишь теория одномерных струн. Он рассуждал так. Одномерная струна, т.е. 1-брана на новом языке теоретиков, может полностью окружить одномерный пространственый объект, например изображенную на рис. 13.1 окружность. (Отметим различие с рис. 11.6, где одномерная движущаяся во времени струна опоясывала двумерную сферу. Рис. 13.1 можно рассматривать в качестве мгновенной фотографии).

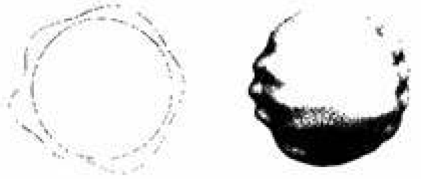

Рис. 13.1. Струна может обернуть одномерный свернутый элемент пространства, а двумерной мембраной можно обернуть двумерный объект.

Аналогично, на рис. 13.1 видно, что двумерная мембрана, т. е. 2-брана, может обернуть и полностью покрыть собой двумерную сферу, подобно тому, как полиэтиленовая пленка плотно обертывает поверхность апельсина. По аналогии Строминджер предположил, что открытые недавно трехмерные объекты теории струн, т.е. 3-браны, могут окутывать и полностью покрывать собой трехмерные сферы, хотя это и сложно представить себе наглядно. Ясно ощутив эту аналогию и выполнив простые стандартные расчеты, Строминджер показал, что 3-брана является как на заказ скроенным экраном, в точности компенсирующим потенциально катастрофические последствия возможного коллапса трехмерной сферы, которых так боялись физики.

Это был прекрасный и важный результат. Но вся его сила открылась лишь некоторое время спустя.

Убежденно разрывая ткань пространства

У физики есть одна захватывающая особенность: уровень понимания этой науки может измениться буквально за одну ночь. На следующее утро после того, как Строминджер послал свою статью в электронную базу данных, я скачал ее из Интернета и прочел в своем кабинете в Корнелле. Используя новые достижения теории струн, Строминджер одним махом разрешил считавшийся одним из самых запутанных вопрос о свертывании лишних измерений в пространство Калаби– Яу. Но после того как я разобрался в статье, мне пришло

в голову, что он, возможно, раскрыл лишь половину того, что могло стоять за этой проблемой.

В описанной в главе 11 более ранней работе о флоп-перестройках с разрывом пространства мы исследовали двухэтапный процесс, в котором двумерная сфера стягивается в точку, приводя к разрыву структуры пространства, а затем раздувается по другим законам, приводя к восстановлению этой структуры. В своей статье Строминджер исследовал, что происходит при сжатии в точку трехмерной сферы; он показал, что благодаря открытым недавно протяженным объектам в теории струн физические свойства остаются хорошо определенными. И на этом его работа заканчивалась. Но нельзя ли исследовать второй этап, включающий, как и ранее, разрыв пространства и его последующее восстановление путем раздутия сфер?

Во время весеннего семестра 1995 г. у меня в Корнелле гостил Дейв Моррисон, и в тот день мы встретились, чтобы обсудить статью Строминджера. Через пару часов нам в общих чертах уже было понятно, что представляет собой второй этап. Вспомнив как Канделас, Грин и Тристан Хюбш (в то время работавший в Техасском университете в Остине) использовали некоторые результаты конца 1980-х гг., полученные математиками Гербом Клеменсом из университета штата Юта, Робертом Фридманом из Колумбийского университета и Майлсом Рейдом из университета в Уорвике, мы поняли, что при коллапсе трехмерной сферы возможен разрыв пространства Калаби-Яу и его последующее восстановление при повторном раздутии сферы. Но здесь нас ожидал сюрприз. Коллапсирующая сфера имела три измерения, а раздувающаяся – всего лишь два. Сложно описать, как это выглядит, но можно проиллюстрировать идею, пользуясь аналогией с меньшим числом измерений. Вместо того чтобы пытаться представить коллапс трехмерной сферы и ее замещение двумерной сферой, представим себе коллапс одномерной сферы и ее замещение нульмерной.

Прежде всего, что такое одномерная или нульмерная сфера? Будем рассуждать по аналогии. Двумерная сфера – это совокупность точек трехмерного пространства, расположенных на одинаковых расстояниях от выбранного центра, как показано на рис. 13.2 а. По аналогии с этим, одномерная сфера есть совокупность точек двумерного пространства (например, поверхности этой страницы), расположенных на одинаковых расстояниях от выбранного центра. Как показано на рис. 13.2б, это просто окружность.

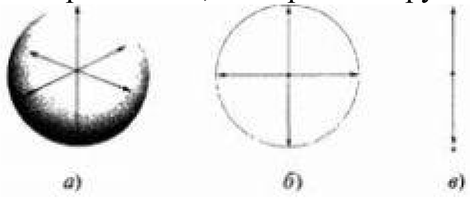

Рис. 13.2. Сферы разных размерностей, допускающих наглядное изображение: а) двумерная, б) одномерная, в) нульмерная.

Наконец, согласно той же аналогии нульмерная сфера есть совокупность точек одномерного пространства (прямой линии), расположенных на одинаковых расстояниях от общего центра. Таким образом, аналогия с меньшим числом измерений, упоминавшаяся в предыдущем параграфе, приводит к окружности (одномерной сфере), которая стягивается, затем происходит разрыв пространства, и окружность замещается нульмерной сферой (двумя точками). На рис. 13.3 иллюстрируется конкретная реализация этой абстрактной идеи.

Рис. 13.3. Окружность в обхвате баранки (тора) коллапсирует в точку. Поверхность рвется, и образуются два прокола. В них «вклеивается» нульмерная сфера (две точки), которая замещает исходную одномерную сферу (окружность) и восстанавливает порванную поверхность. При этом становится возможным преобразование в фигуру совершенно иной формы – надувной мяч.

Предположим, что сначала имеется поверхность тора (баранки), в которую вложена одномерная сфера (окружность) – она выделена на рис. 13.3. Теперь представим, что с течением времени эта окружность стягивается, и структура пространства рвется. Можно

восстановить пространство," позволив ему разорваться лишь на мгновение и заменив сжатую одномерную сферу (стянутую окружность) нульмерной сферой – двумя точками, затыкающими отверстия в верхней и нижней части образовавшейся после разрыва фигуры. Как показано на рис. 13.3, в результате получится фигура, похожая на кривой банан, которую затем можно постепенно и гладко (без разрывов пространства) продеформировать в поверхность надувного мяча. В итоге мы видим, что при коллапсе одномерной сферы и замещении ее нульмерной топология исходного тора, т. е. его фундаментальная форма, радикально изменяется. В контексте свернутых пространственных измерений эволюция с разрывом пространства, изображенная на рис. 13.3, привела бы вселенную, показанную на рис. 8.8, к виду на рис. 8.7.

И хотя все это лишь аналогия с меньшим числом измерений, здесь улавливаются основные идеи нашей с Моррисоном гипотезы о втором этапе, продолжающем исследования Строминджера. Нам казалось, что после коллапса трехмерной сферы внутри пространства Калаби-Яу пространство должно разорваться, а затем само собой восстановиться путем отращивания двумерной сферы, приводя к гораздо более серьезным изменениям топологии, чем те, которые Виттен и мы обнаружили в наших предыдущих работах (см. главу 11). При этом одно многообразие Калаби-Яу может, по существу, превратиться в совершенно иное многообразие Калаби-Яу (подобно тому, как тор превратился в сферу на рис. 13.3), но физические характеристики будут по-прежнему хорошо определены. Хотя картина начала вырисовываться, мы знали, что потребуется проработать некоторые важные моменты до того, как можно будет заявить о том, что на нашем втором этапе не возникают сингулярности, т. е. пагубные и неприемлемые для физики последствия. В тот вечер мы оба отправились домой в приподнятом настроении, ощущая близость нового важного результата.

Шквал электронной почты

На следующее утро я получил по электронной почте письмо от Строминджера, спрашивавшего о моей реакции на его статью. Он упомянул, что эта статья «должна быть как-то связана с Вашей работой вместе с Аспинуоллом и Моррисоном». Как выяснилось, он тоже исследовал возможную связь с эффектом изменения топологии. Я немедленно написал ему, очертив грубую схему, к которой мы с Моррисоном пришли накануне. Его ответ показал, что он возбужден не меньше, чем мы с Моррисоном после вчерашней встречи.

На протяжении следующих нескольких дней между нами троими циркулировал непрерывный поток электронной почты: мы лихорадочно пытались строго на цифрах обосновать идею о радикальном изменении топологии при разрыве пространства. Медленно, но верно, все вставало на свои места. К следующей среде, через неделю после того, как Строминджер опубликовал свой результат в Интернете, у нас был набросок совместной статьи, в котором описывалось новое поразительное преобразование структуры пространства после коллапса трехмерной сферы.

На следующий день у Строминджера был запланирован доклад на семинаре в Гарварде, и рано утром он вылетел из Санта-Барбары. Мы договорились, что Моррисон и я будем оттачивать последние детали нашей статьи и к вечеру пошлем ее в электронный архив. К 23:45 я проверил и перепроверил все наши вычисления – все прекрасно сходилось. Поэтому я отослал статью и отправился в корпус физики. Пока мы с Моррисоном шли к машине (я собирался подбросить его до дома, который он снял до конца семестра), наш разговор перешел в спор, в котором мы сами для себя играли роль критиков, изо всех сил пытающихся доказать, что наши результаты неверны. Пока мы выруливали со стоянки и выезжали с территории университета, мы поняли, что при всей силе и убедительности нашей аргументации, она не является совершенно пуленепробиваемой. Никто из нас не сомневался, что работа безошибочна, но нам пришлось признать, что сила наших доводов и отдельные выбранные нами словесные формулировки в некоторых местах статьи могут дать повод для яростных споров, завуалировав важность полученных результатов. Мы сошлись на том, что

при подготовке статьи следует придерживаться более скромной позиции и снизить напор наших доводов: это позволило бы физикам самим оценить достоинства статьи, не втягиваясь в возможные дискуссии по поводу того, в какой форме наши результаты представлены.

По дороге Моррисон напомнил мне, что по правилам электронного архива мы можем редактировать статью до двух ночи, после чего она будет выложена для общего доступа. Я немедленно повернул машину, и мы помчались обратно в корпус физики. Мы забрали первоначальный вариант статьи и стали думать о том, как смягчить ее стиль. К счастью, все было довольно просто. Замена нескольких слов в особо ответственных параграфах сгладила резкие углы нашей аргументации без ущерба для содержания работы. Через час мы отослали статью снова и договорились не упоминать о ней всю дорогу до дома Моррисона.

Еще до полудня следующего дня стало ясно, что реакция на статью весьма активная. Среди многих ответов по электронной почте было и письмо Плессера. В нем содержалась наивысшая похвала, которой один физик может удостоить другого: «Как жаль, что эта мысль пришла в голову не мне!». Несмотря на наши опасения предыдущей ночи, нам удалось убедить сообщество физиков в том, что структура пространства может подвергаться не только открытым ранее умеренным разрывам (см. главу 11), но и гораздо более сильным, изображенным на рис. 13.3.

Снова о черных дырах и элементарных частицах

Есть ли у всего этого какая-нибудь связь с черными дырами и элементарными частицами? Таких связей множество. Чтобы это понять, нужно задаться тем же вопросом, что и в главе 11. К каким наблюдаемым следствиям приведут такие разрывы структуры пространства? Для флоп-перестроек, обсуждавшихся выше, неожиданно оказывается, что нет практически никаких наблюдаемых последствий. В случае конифолдных переходов – такое название мы дали недавно переходам с сильным разрывом пространства, – как и ранее, не происходит никакой физической катастрофы (она случилась бы в традиционной теории относительности), но здесь имеется больше ярко выраженных наблюдаемых последствий.

Наблюдаемые последствия основаны на двух связанных идеях. Рассмотрим их по очереди. Во-первых, как обсуждалось выше, суть исходной работы Строминджера состояла в открытии того, что трехмерная сфера внутри пространства Калаби-Яу может коллапсировать без возникновения катастрофы, так как обертывающая ее 3-брана служит надежным защитным экраном. Но как выглядит эта конструкция с обернутой вокруг сферы 3-браной? Ответ дает более ранняя работа Хоровица и Строминджера, в которой показано, что для существ типа нас с вами, органам чувств которых прямо доступны лишь три развернутых пространственных измерения, «оборачивающиеся» вокруг трехмерной сферы 3-браны предстанут в виде гравитационного поля сродни полю черной дыры2). Этот факт не очевиден, и становится ясен только после тщательного изучения описывающих браны уравнений. Здесь, как и выше, сложно изобразить многомерную конфигурацию на двумерном рисунке, но примерное представление по аналогии с двумерными сферами можно получить из рис. 13.4. Видно, что двумерная мембрана может обернуться вокруг двумерной сферы (которая сама покоится внутри пространства Калаби-Яу, находящегося в некоторой точке пространства развернутых измерений).

Рис. 13.4. Когда брана обертывает сферу, покоящуюся в свернутых измерениях, она

выглядит как черная дыра в обычных пространственных измерениях.

Некто, наблюдающий эту точку сквозь развернутые измерения, почувствует брану по ее массе и заряду, и, как показали Хоровиц и Строминджер, судя по этим характеристикам, сможет сделать вывод, что перед ним черная дыра. Кроме того, в основополагающей работе 1995 г. Строминджер показал, что масса 3-браны, т. е. масса черной дыры, пропорциональна объему трехмерной сферы, которую она обертывает. Чем больше объем сферы, тем больше должна быть обертывающая ее 3-брана, и тем больше ее масса. Аналогично, чем меньше объем сферы, тем меньше масса обертывающей ее 3-браны. По мере сжатия сферы обертывающая ее 3-брана, которая выглядит, как черная дыра, становится легче. В момент, когда трехмерная сфера стягивается в точку, соответствующая черная дыра (соберитесь с духом!) становится безмассовой. На первый взгляд, это совершенно непостижимо (что это еше за безмассовая черная дыра?), но чуть ниже мы свяжем этот загадочный феномен со знакомой физикой струн.

Во-вторых, напомним, что, как обсуждалось в главе 9, число отверстий многообразия Калаби-Яу определяет число низкоэнергетических (а, следовательно, имеющих малую массу) колебательных мод струны, которыми могут описываться перечисленные в табл. 1.1 частицы, а также типы взаимодействий. Но так как при конифолдных переходах с разрывом пространства число отверстий меняется (например, как на рис. 13.3, где отверстие тора исчезло в процессе разрыва/восстановления), можно ожидать и изменения числа колебательных мод малой массы. Действительно, после того, как Моррисон, Строминджер и я тщательно изучили этот вопрос, мы обнаружили, что при замещении сжимающейся трехмерной сферы в свернутых измерениях Калаби-Яу двумерной сферой число безмассовых колебательных мод струны возрастает ровно на единицу. (Пример, приведенный на рис. 13.3, где баранка превращается в мяч, может создать ложную иллюзию, что число отверстий, а, следовательно, и число мод, уменьшается. На самом деле, это артефакт маломерной аналогии.)

Чтобы связать идеи, описанные в двух предыдущих параграфах, представим себе последовательность снимков пространства Калаби-Яу при постепенном уменьшении размеров некоторой сидящей внутри трехмерной сферы. Из первой идеи следует, что масса 3-браны, обертывающей трехмерную сферу и кажущейся нам черной дырой, будет уменьшаться и станет равной нулю в момент коллапса. Теперь, пользуясь второй идеей, мы можем ответить на поставленный выше вопрос о том, что означает обращение массы в ноль. Согласно нашей работе, новая безмассовая колебательная мода струны, возникающая при конифолдном переходе с разрывом пространства, на микроскопических масштабах описывает безмассовую частицу, в которую превращается черная дыра. Вывод такой: при эволюции многообразия Калаби-Яу, сопровождающейся конифолдным переходом с разрывом пространства, изначально ненулевая масса черной дыры уменьшается до нуля, после чего черная дыра превращается в безмассовую частицу (подобную фотону), которая на языке теории струн описывается определенной колебательной модой струны. Таким образом, в теории струн впервые удается установить прямую, точную и количественно неопровержимую связь между черными дырами и элементарными частицами.

«Таяние» черных дыр

Найденная связь между черными дырами и элементарными частицами по своей природе близка классу явлений, которые мы наблюдаем в повседневной жизни, и которые в физике называют фазовыми переходами. Простой пример фазового перехода упоминался в предыдущей главе: вода может существовать в твердом состоянии (лед), в жидком состоянии (жидкая вода) или в газообразном состоянии (пар). Эти состояния называют фазами воды, а превращения из одного состояния в другое – фазовыми переходами. Моррисон, Строминджер и я показали, что между фазовыми переходами и конифолдными переходами многообразий Калаби-Яу существует тесная математическая и физическая связь. Так же, как

не видевшее жидкой воды или твердого льда существо не поймет, что перед ним две фазы одного вещества, физики ранее не понимали, что изучавшиеся ими черные дыры и элементарные частицы являются двумя фазами одной струнной материи. Подобно тому, как температура определяет фазу, в которой при нормальном давлении находится вода, топологический вид дополнительных измерений Калаби-Яу определяет то, в каком обличий предстанут перед нами определенные физические конфигурации в теории струн: как черные дыры или как элементарные частицы. В первой фазе – исходное многообразие Калаби-Яу (для определенности, аналог льда) – будет обнаружено присутствие черных дыр. Во второй фазе – другое многообразие Калаби-Яу (аналог воды) – черные дыры подверглись фазовому переходу, «растаяли», и перешли в фундаментальные колебательные моды струны. Разрывы пространства при конифолдных переходах переводят многообразия Калаби-Яу из одной фазы в другую. Так что черные дыры и элементарные частицы, как вода и лед, являются двумя сторонами одной монеты. Мы видим, что черные дыры хорошо вписываются в формализм теории струн.

Для кардинальных переходов с разрывом пространства и для переходов от одной из пяти формулировок теории струн к другой (см. главу 12) умышленно использовалась одна и та же аналогия с водой, так как эти переходы тесно связаны. Вспомним (см. рис. 12.11), что пять теорий струн дуальны друг другу и, следовательно, объединены под эгидой охватывающей их единой теории.

Но сохранится ли возможность непрерывного перехода от одного описания к другому, т. е. возможность попасть в любую точку карты рис. 12.11 из любой другой, и после того, как мы будем свертывать лишние измерения в разные многообразия Калаби-Яу? До открытия переходов с кардинальным изменением топологии ожидаемый ответ был отрицательным, так как до этого открытия не было известно, как деформировать одно многообразие Калаби-Яу в другое. Однако сейчас мы видим, что ответ положительный. Путем физически допустимых конифолдных переходов с разрывом пространства можно непрерывно преобразовать любое заданное многообразие Калаби-Яу в любое другое. Все струнные модели, полученные изменениями константы связи и геометрии пространства Калаби-Яу, будут разными фазами единой теории. Целостность схемы рис. 12.11 сохранится даже после сворачивания всех дополнительных измерений.

Энтропия черной дыры

Многие годы самые лучшие специалисты в области теоретической физики рассуждали о возможности процессов с разрывом пространства и о связи между черными дырами и элементарными частицами. Хотя ранее такие рассуждения могли казаться научной фантастикой, открытие теории струн, в результате которого стало возможным объединение общей теории относительности и квантовой теории, позволило уверенно выдвинуть эти вопросы на передний край современной науки. Успехи теории струн вдохновляют на исследование вопроса о том, не могут ли и другие таинственные свойства Вселенной, десятилетиями не поддававшиеся решению, уступить натиску всемогущей теории струн? Важнейшим из этих свойств является энтропия черной дыры. Именно в области изучения энтропии черной дыры теория струн наиболее выразительно продемонстрировала свою гибкость и дала возможность разрешить важнейшую проблему, поставленную еще четверть века назад.

Энтропия – это мера беспорядка или хаотичности. Например, если рабочее место завалено открытыми книгами, недочитанными статьями, старыми газетами и еше не попавшими в мусорное ведро рекламными проспектами, то степень его беспорядка велика, и оно имеет высокую энтропию. И наоборот, если статьи рассортированы по темам в разные папки, газеты аккуратно разложены по номерам, книги расставлены по алфавиту, а все ручки и карандаши стоят в своих подставках, то рабочее место находится в хорошем порядке, и имеет низкую энтропию. Этот пример иллюстрирует суть понятия энтропии, однако ученые

дали ей строгое количественное определение, позволяющее описывать энтропию тел с помощью численных значений. Чем больше численное значение, тем больше энтропия, и наоборот. Хотя подробности вычислений не очень просты, это число, грубо говоря, равно числу всевозможных перегруппировок элементов данной физической системы, при которых ее общий вид не изменяется. Если рабочее место прибрано, то почти всякая перестановка – изменение порядка газет, книг, статей, или перемещение ручки из держателя на стол – приведет к нарушению порядка. С другой стороны, если на рабочем месте беспорядок, то при множестве вариантов перекладываний газет, статей и т.д. беспорядок так и останется беспорядком, и общий вид рабочего места не изменится. Поэтому в последнем случае энтропия велика.

Конечно, примеру перегруппировки предметов на рабочем месте с его нечетким определением того, какие именно перегруппировки «не изменяют общий вид», не достает научной точности. На самом деле, в строгом определении энтропии рассматриваются микроскопические квантово-механические параметры, описывающие элементарные физические составные части системы, и для этих параметров вычисляется число возможных перегруппировок, при которых итоговые макроскопические параметры (например, энергия или температура) не изменяются. Детали несущественны, если понятен факт, что квантово-механическая энтропия является строгим понятием, позволяющим точно измерять общий беспорядок в физических системах.

В 1970 г. Якоб Бекенштейн, в то время учившийся в аспирантуре Принстонского университета у Джона Уилера, сделал смелое предположение. Он выдвинул замечательную идею о том, что черные дыры обладают энтропией, которая очень велика. Бекенштейн опирался на общепризнанное и хорошо проверенное второе начало термодинамики, согласно которому энтропия системы постоянно растет. Все движется в направлении еще большего беспорядка. Даже если физик сделает, наконец, уборку своего рабочего места, уменьшив энтропию, полная энтропия, в которую входит энтропия самого физика и энтропия воздуха в комнате, увеличится. Действительно, на уборку рабочего места уходит энергия, и эта энергия вырабатывается внутри тела физика при расщеплении молекул в упорядоченных жировых складках тела, переходя в мускульную силу. Кроме того, при уборке его тело отдает теплоту, и окружающие молекулы воздуха увеличивают скорость, приводя к увеличению беспорядка. Если учесть все подобные эффекты, они с лихвой компенсируют уменьшение энтропии рабочего места, так что полная энтропия возрастет.

Но что произойдет, рассуждал далее Бекенштейн, если сделать уборку рабочего места вблизи горизонта событий черной дыры и откачать насосом все разогнанные молекулы, образовавшиеся во время уборки, в бездонный омут черной дыры? Можно поступить еще более радикально: откачать весь воздух, все содержимое рабочего стола вместе со столом, да и самого бедного физика, оставив пустую, зато идеально прибранную комнату. Так как очевидно, что энтропия в комнате уменьшится, Бекенштейн пришел к выводу, что второе начало термодинамики не будет нарушено лишь в случае, если у черной дыры тоже есть энтропия, и эта энтропия постоянно растет по мере засасывания в черную дыру материи, компенсируя наблюдаемое уменьшение энтропии снаружи черной дыры.

На самом деле Бекенштейну для усиления своей аргументации удалось даже привлечь знаменитый результат Стивена Хокинга, который показал, что площадь горизонта событий черной дыры, т. е. площадь поверхности вокруг черной дыры, после пересечения которой нет пути назад, всегда увеличивается при любых физических взаимодействиях. Хокинг продемонстрировал, что если в черную дыру попадет астероид, или если на черную дыру попадет излучение с поверхности близкой звезды, или если две черные дыры столкнутся и объединятся, то полная площадь горизонта событий черной дыры обязательно увеличится. Для Бекенштейна неуемный рост этой площади был связующим звеном с неумолимым ростом энтропии согласно второму началу термодинамики. Он предположил, что площадь горизонта событий черной дыры и есть точная мера ее энтропии.

Однако при ближайшем рассмотрении можно найти два объяснения тому, почему

большинство физиков считали, что идея Бекенштейна неверна. Во-первых, черные дыры кажутся одними из наиболее упорядоченных и организованных объектов во всей Вселенной. Как только измерена масса, заряд и спин черной дыры, ее точную идентификацию можно считать завершенной. При столь малом числе определяющих свойств кажется, что у черных дыр нет достаточной структуры, в которой мог бы возникнуть беспорядок. Черные дыры казались слишком простыми для поддержания беспорядка: если на столе лежат лишь книга и карандаш, трудно разгуляться и устроить на нем хаос. Вторая причина того, что аргументы Бекенштейна воспринимались плохо, заключается в следующем. Как обсуждалось выше, энтропия является квантово-механическом понятием, а черные дыры до последнего времени относили к враждебному лагерю традиционной общей теории относительности. В начале 1970-х гг., когда еше не был известен способ объединения теории относительности и квантовой теории, обсуждение энтропии черной дыры казалось, по меньшей мере, нелепым.

Насколько черно черное?

Оказалось, что Хокинг тоже думал о схожести закона об увеличении площади горизонта черной дыры и закона о неминуемом росте энтропии, но решил, что эта аналогия есть просто совпадение, и выбросил ее из головы. В конце концов, рассуждал Хокинг, если принимать аналогию между черными дырами и термодинамикой всерьез, придется не только отождествить площадь горизонта событий черной дыры с энтропией, но при этом, как следовало из его работ и совместных работ с Джеймсом Бардином и Брендоном Картером, приписать черной дыре температуру (точное значение которой определялось бы напряженностью гравитационного поля на горизонте событий). А если у черной дыры есть сколь угодно малая ненулевая температура, то она, в соответствии с фундаментальными и хорошо установленными физическими принципами, должна излучать энергию, подобно раскаленному металлическому пруту. Но черные дыры – черные, и по определению не могут ничего излучать. Хокинг и почти все остальные сошлись на том, что данный факт, несомненно, позволяет исключить из рассмотрения утверждение Бекенштейна. И Хокинг начал склоняться к мысли о том, что если несущая энтропию материя попадает в черную дыру, то энтропия теряется, и дело с концом. Так что нечего говорить о втором начале термодинамики.

Так продолжалось до конца 1974 г., когда Хокинг обнаружил нечто совершенно поразительное. Черные дыры, объявил Хокинг, не совсем черные. Если пренебречь квантовыми эффектами и опираться только на традиционную общую теорию относительности, то черные дыры, как было обнаружено еше шестьдесят лет назад, конечно, не дадут ничему, даже свету, вырваться из своих гравитационных объятий. Но учет квантово-механических эффектов сильно меняет картину. Даже не обладая квантово-механическим вариантом общей теории относительности, путем ухищренных приемов Хокинг сумел построить частичное объединение двух теорий: оно было применимо лишь к небольшому числу ситуаций, но давало надежные результаты. И наиболее важным из них был результат о том, что на квантовом уровне черные дыры действительно излучают.

Расчеты очень длинны и сложны, но основная идея Хокинга проста. Как обсуждалось выше, согласно соотношению неопределенностей даже в пустом пространстве кишит рой виртуальных частиц, на мгновение вырывающихся из вакуума и аннигилирующих друг с другом. Этот хаотический процесс происходит и снаружи черной дыры, рядом с ее горизонтом событий. И Хокинг понял, что гравитационная сила черной дыры может передать энергию паре виртуальных частиц, засасывая внутрь себя одну частицу из пары. Если одна из частиц исчезла в бездне черной дыры, то вторая остается без партнера, с которым она может аннигилировать. Вместо этого, как показал Хокинг, уцелевшей частице передается энергия гравитационного поля черной дыры и, пока ее партнера засасывает в бездну, она выталкивается прочь от черной дыры. Хокинг понял, что для наблюдателя, уютно устроившегося на безопасном расстоянии от черной дыры, и регистрирующего

совокупный результат этого непрерывно происходящего вокруг черной дыры разлучения пар, будет казаться, что из черной дыры исходит непрерывное излучение. Черные дыры светятся.

Более того, Хокингу удалось вычислить температуру, которую наблюдатель приписал бы этому излучению: оказалось, что она определяется напряженностью гравитационного поля на горизонте черной дыры, в точном согласии с аналогией между черными дырами и термодинамикой3). Бекенштейн был прав, и результаты Хокинга показали, что его аналогию следует воспринимать всерьез. На самом деле результаты показали, что это даже не аналогия – это тождественность. У черной дыры есть энтропия. У черной дыры есть температура. И законы физики гравитации черной дыры – не что иное, как законы термодинамики в крайне необычных условиях. В этом состоял ошеломляющий результат исследований Хокинга 1974 г.

Чтобы читатель понял, о каких масштабах величин идет речь, приведем пример: черная дыра с массой, втрое превышающей массу Солнца, будет, после учета всех эффектов, иметь температуру примерно 10-8 К.

Не нуль – но только чуть теплее. Черные дыры не точно черны – но только чуть светлее. К сожалению, по этой причине излучение черной дыры очень слабое, и его невозможно обнаружить экспериментально. Однако есть исключение. Из вычислений Хокинга следует еще один факт: чем меньше масса черной дыры, тем выше ее температура, и тем сильнее ее излучение. Например, излучение черной дыры массой с небольшой астероид сравнимо с излучением водородной бомбы мощностью в миллион мегатонн, причем это излучение сконцентрировано на шкале электромагнитных волн в гамма-области. Ночами астрономы пытались поймать такое излучение, но улов был невелик: лишь несколько кандидатов с малыми шансами на успех. Это наводит на мысль, что если черные дыры с такими малыми массами и существуют, то они крайне редки4). Как часто шутит Хокинг, это плохо, так как если бы предсказанное излучение черных дыр обнаружили, Нобелевская премия была бы ему гарантирована5).

По сравнению с этой мизерной температурой в миллионные доли градуса, вычисление энтропии черной дыры массой три массы Солнца дает грандиозное число: единицу с 78 нулями! И чем массивнее дыра, тем энтропия больше. Успех расчетов Хокинга недвусмысленно показывает, какой несусветный беспорядок творится внутри черной дыры.

Но беспорядок чего? Как мы видели, черные дыры – крайне примитивные объекты, в чем же причина этого беспорядка? Здесь расчеты Хокинга полностью немы. Его частичное объединение теории относительности и квантовой теории можно использовать для вычисления значения энтропии черной дыры, но постичь ее микроскопический смысл с помощью такой теории невозможно. Почти четверть века величайшие физики пытались понять, какими микроскопическими свойствами черных дыр можно объяснить такое значение их энтропии. Без действительно надежного сплава общей теории относительности и квантовой теории могли возникать проблески ответа, но тайна так и оставалась нераскрытой.

Ваш выход, теория струн!

Но так было до конца 1996 г., пока Строминджер и Вафа, опираясь на более ранние результаты Сасскинда и Сена, не написали работу «Микроскопическая природа энтропии Бекенштейна и Хокинга», появившуюся в электронном архиве статей по физике. В этой работе Строминджеру и Вафе удалось использовать теорию струн для нахождения микроскопических компонентов определенного класса черных дыр, а также для точного вычисления вкладов этих компонентов в энтропию. Работа была основана на применении нового метода, частично выходящего за рамки теории возмущений, которую использовали в 1980-х и в начале 1990-х гг. Результат работы в точности совпадал с предсказаниями Бекенштейна и Хокинга и наносил последние штрихи на картину, начатую более двадцати

лет назад.

Строминджер и Вафа сосредоточили внимание на так называемых экстремальных черных дырах. Такие черные дыры наделены зарядом (можно считать его электрическим зарядом) и, кроме того, имеют наименьшую возможную массу, совместимую с этим зарядом. Как видно из приведенного определения, подобные черные дыры тесно связаны с рассмотренными в главе 12 БПС-состояниями. И Строминджер с Вафой выжали из этой связи все, что могли. Они продемонстрировали, что можно построить (теоретически, разумеется) экстремальные черные дыры, если выбрать конкретный набор БПС-бран (определенных размерностей), а затем связать эти браны, действуя по точной математической схеме. Строминджер и Вафа показали, что подобно тому, как можно построить (еще раз, теоретически!) атом, если взять набор кварков и электронов, а затем точно сгруппировать их в протоны и нейтроны с вращающимися по орбитам электронами, некоторые из недавно обнаруженных компонентов теории струн можно слепить вместе и получить определенные черные дыры.

В реальном мире образование черных дыр является только одним из возможных вариантов гибели звезд. После того, как за миллиарды лет ядерного синтеза звезда сжигает весь запас ядерного топлива, она оказывается неспособной далее компенсировать сжимающую громадную силу гравитации направленным наружу давлением. Для широкого класса условий это приводит к катастрофическому взрыву огромной массы звезды: под действием собственной силы тяжести она коллапсирует, образуя черную дыру. Реальным процессам образования черных дыр Строминджер и Вафа противопоставили «конструктивный» подход. Они изменили точку зрения на образование черных дыр, показав, что их можно конструировать (в воображении теоретика) по строгому набору правил – путем кропотливой, неспешной и дотошной сборки в один механизм точного набора бран, открытых во время второй революции в теории суперструн.

Сила этого подхода сразу стала очевидной. Имея в руках все рычаги управления микроскопической конструкцией черной дыры, Строминджер и Вафа смогли легко вычислить число перестановок микроскопических компонентов черной дыры, при которых общие наблюдаемые характеристики, например масса и заряд, остаются неизменными. После этого они сравнили полученное число с площадью горизонта событий черной дыры – энтропией, предсказанной Бекенштейном и Хокингом. При этом обнаружилось идеальное согласие. По крайней мере, для класса экстремальных черных дыр Строминджеру и Вафе удалось найти приложение теории струн для анализа микроскопических компонентов и точного вычисления соответствующей энтропии. Проблема, стоявшая перед физиками в течение четверти века, была решена6).

Для многих теоретиков это открытие было важным и убедительным аргументом в поддержку теории струн. Наше понимание теории струн до сих пор остается слишком грубым для прямого и точного сравнения с экспериментальными результатами, например, с результатами измерений масс кварка или электрона. Но сейчас видно, что теория струн дает первое фундаментальное обоснование давно открытого свойства черных дыр, невозможность объяснения которого многие годы тормозила исследования физиков, работавших с традиционными теориями. И это свойство черных дыр тесно связано с предсказанием Хокинга об их излучении, которое, в принципе, может быть проверено экспериментально. Последнее, разумеется, означает, что сначала нужно точно зарегистрировать на небе черную дыру, а затем сконструировать оборудование, достаточно чувствительное для регистрации ее излучения. Если бы черные дыры были не такими черными, то сделать это можно было бы уже сегодня. Несмотря на то, что экспериментальная программа еще не увенчалась успехом, полученный результат говорит о том, что пропасть между теорией струн и реальностью можно преодолеть. Даже Шелдон Глэшоу, убежденный противник теории струн в 1980-е гг., недавно признался, что «когда струнные теоретики говорят о черных дырах, речь идет едва ли не о наблюдаемых яалениях, и это впечатляет»7'.

Нераскрытые тайны черных дыр

Даже после этого впечатляющего прогресса остаются две важнейшие проблемы, связанные с черными дырами. Первая связана с тем, что понятие черной дыры изменяет наши представления о детерминизме. В начале XIX в. французский математик Пьер Симон Лаплас огласил строгие и далеко идущие последствия для нашей Вселенной, вытекающие из законов Ньютона: «Знание, которое в данный момент способно было бы узреть все силы, движущие природой, как и их обстоятельства у истоков сего движения, будь знание это к тому же столь велико, что все данные можно было бы подвергнуть анализу, охватило бы одной формулой и движения величайших тел во Вселенной, и движения легчайших атомов. Для знания такого ничто не было бы неясным, и будущее, равно как и прошлое, открылось бы его взору»8).

Другими словами, если в некоторый момент известны положения и скорости всех частиц во Вселенной, с помощью законов Ньютона можно определить (по крайней мере, в принципе) их положения и скорости для любого момента времени в прошлом или в будущем. С этой точки зрения все без исключения события, будь то образование Солнца, распятие Христа или все наши телодвижения в этом мире, строго вытекают из точных значений координат и скоростей частиц Вселенной в момент после Большого взрыва. В этой жесткой, не допускающей отклонений модели эволюции Вселенной встает множество запутанных философских проблем, связанных с вопросом о свободе выбора, но их актуальность сильно снизилась после открытия квантовой механики. Как обсуждалось, соотношение неопределенностей Гейзенберга подрывает детерминизм Лапласа, так как в принципе нельзя узнать точные положения и скорости элементов Вселенной. На смену классическому пришло описание в терминах волновых функций, в котором можно рассуждать лишь о вероятностях того, что данная частица находится в том или ином месте, либо имеет ту или иную скорость.

Однако низвержение аргументов Лапласа не было полным крахом концепции детерминизма. Волновые функции, описывающие вероятности в квантовой механике, изменяются во времени по совершенно определенным математическим правилам, таким, как уравнение Шредингера (или его более точные релятивистские обобщения, например уравнение Дирака и уравнение Клейна-Гордона). Это говорит о том, что классический детерминизм Лапласа заменяется квантовым детерминизмом. Зная волновые функции всех фундаментальных объектов Вселенной в определенный момент времени, «достаточно обширный разум» может определить волновые функции в любой предшествующий или последующий момент. Квантовый детерминизм утверждает, что вероятность определенного события в выбранный момент времени в будущем полностью определяется знанием волновых функций в любой предшествующий момент. Вероятностная картина квантовой механики существенно смягчает детерминизм Лапласа, замещая неизбежность исходов их возможностью, однако последняя полностью определяется в общепринятом формализме квантовой теории.

В 1976 г. Хокинг объявил, что даже этот смягченный вариант детерминизма нарушается из-за существования черных дыр.

Эти вычисления, как и вычисления энтропии, были невероятно сложными, но главная мысль легко уловима. Если какой-нибудь объект попадает в черную дыру, туда же отправляется и его волновая функция. Но это означает, что наш «достаточно обширный разум», пытающийся определить волновые функции для будущих моментов, будет фатально сбит с толку черной дырой. Чтобы полностью предсказать то, что будет завтра, сегодня нам нужно знать все волновые функции. И если некоторые из них сгинули в омуте черной дыры, то содержащаяся в них информация потеряна.

На первый взгляд это осложнение, вызванное существованием черных дыр, может показаться несущественным. Все, что скрылось за горизонтом событий черной дыры, отрезано от остального мира – так не проще ли вообще забыть об объектах, которых

угораздило туда попасть? Кроме того, рассуждая философски, разве нельзя представить себе, что информация, которую переносили попавшие о дыру объекты, не потеряна для Вселенной, а просто скрыта в области пространства, которую мы, разумные существа, решили избегать любой ценой? До открытия Хокингом того, что черные дыры не совсем черные, ответ на эти вопросы был бы положительным. Но результат Хокинга об излучении черных дыр все меняет. Излучение переносит энергию, и поэтому при излучении черной дыры ее масса медленно уменьшается – дыра медленно испаряется. При этом расстояние от центра дыры до горизонта событий постепенно сокращается, и когда завеса отступает, прежде отрезанные от мира области снова оказываются на сцене космического бытия. Вот тут-то мы со своими философскими доводами и наступаем на грабли: восстановится ли информация, которую переносили проглоченные дырой объекты и которая, как мы представляли, хранится внутри черной дыры, после того, как черная дыра испарится? Без этой информации квантовый детерминизм будет нарушен, так что последний вопрос приобретает глубокий смысл: не могут ли черные дыры вносить еще больший элемент случайности в эволюцию Вселенной?

В момент, когда писалась эта глава, у физиков не было единодушного мнения по данному вопросу. Многие годы Хокинг настойчиво утверждал, что информация не восстанавливается: черные дыры разрушают ее, «вводя новый уровень неопределенности в физику, усугубляющий общеизвестную неопределенность в квантовой теории»9). Хокинг и Кип Торн из Калифорнийского технологического института даже поспорили с Джоном Прескиллом из того же института о том, что произойдет с информацией, захваченной черной дырой. Хокинг и Торн ставили на то, что информация будет потеряна, а Прескилл – на то, что информация восстановится при излучении и уменьшении черной дыры. Угадайте, на что они спорили? На саму информацию: «Проигравший(е) обязуется приобрести для победителя(ей) энциклопедию на выбор победителя (ей)».

И хотя спор все еще не разрешен, недавно Хокинг признал, что в свете обсуждавшегося нового понимания черных дыр в теории струн может существовать способ восстановления информации10). Идея состоит в том, что для типов черных дыр, изученных Строминджером и Вафой (а также многими физиками, вовлеченными в подобные исследования их статьей), информацию можно хранить в компонентных бранах, а затем извлекать из них. По выражению Строминджера, этот результат «возбудил у некоторых теоретиков желание заявить о победе, о том, что при испарении черных дыр информация восстанавливается. По-моему, этот вывод является преждевременным, и предстоит сделать еще немало, чтобы определить, правильный он или нет»11). Так же считает и Вафа, заявляя, что он «в этом вопросе агностик: здесь все еще возможен любой исход»12). Ответ на поставленный вопрос является главной задачей текущих исследований. Приведем слова Хокинга: «Большинство физиков хотят верить, что информация не теряется, так как в этом случае мир будет надежным и предсказуемым. Но я считаю, что если принимать эйнштейновскую теорию относительности всерьез, придется допустить, что пространство-время может само связываться в узлы, приводя к потере информации в их складках. Определение того, может ли информация теряться на самом деле, является одним из важнейших вопросов современной теоретической физики»13).

Вторая нераскрытая тайна черных дыр связана с природой пространства-времени в центре черной дыры14). Прямо применяя формулы общей теории относительности, которыми пользовался Шварцшильд еще в 1916 г., можно показать, что огромные масса и энергия, сосредоточенные в черной дыре, приводят к возникновению разрушительных разрывов ткани пространства-времени, в результате которых оно должно будет закручиваться в конфигурацию с бесконечной кривизной, образуя прокол пространства-времени. Один из выводов, которые делали физики из существования таких сингулярностей, состоял в том, что вся материя, пересекающая горизонт событий черной дыры, будет безвозвратно затянута к центру черной дыры, и с этого момента материя перестанет существовать – внутри черной дыры исчезнет само время. Другие физики, долгое

время исследовавшие черные дыры с помощью уравнений Эйнштейна, открыли не укладывающуюся в голове возможность того, что черная дыра может быть окном в другую вселенную, связанную с нашей лишь в центре черной дыры. Грубо говоря, там, где останавливаются стрелки часов нашей Вселенной, начинается отсчет времени вселенной, которая прикреплена к нашей.

Некоторые из следствий этой поразительной перспективы будут рассмотрены в следующей главе, здесь же хочется отметить один важный момент. Нужно вспомнить главный вывод: в экстремальных ситуациях, возникающих при чрезвычайно высоких плотностях ввиду огромных масс и малых размеров, классическая теория Эйнштейна становится неприменимой, и для описания таких ситуаций необходимо ее квантовое обобщение. Здесь напрашивается вопрос о том, может ли для анализа сингулярностей в центре черной дыры оказаться полезной теория струн? Этот вопрос в настоящее время интенсивно исследуется, но из-за возникшей проблемы потери информации он все еще не решен. Теория струн ловко расправляется с множеством сингулярностей других типов, возникающих, например, при разрывах пространства, которые обсуждались в главе 11 и в начале этой главы15'. Но если обнаружен один тип сингулярности, это не значит, что все остальные будут иметь тот же характер. Структура пространства может рваться, прокалываться и раздираться многими разными способами. Теория струн дала нам глубокое понимание одних типов сингулярностей, но другие, среди которых и сингулярности черной дыры, до сих пор не поддаются теоретическому описанию. И снова, главная причина этого – невозможность выхода за рамки теории возмущений, которая, в данном случае, затрудняет проведение всестороннего и достоверного анализа того, что происходит внутри черной дыры.

Тем не менее, с учетом последних грандиозных достижений в разработке методов, не опирающихся на теорию возмущений, и успешных применений этих методов к другим задачам теории черных дыр, у теоретиков появились большие надежды на то, что разгадка тайн происходящих в глубине черной дыры явлений уже не за горами.

Глава 14. Размышления о космологии

На протяжении многих веков истории человечества люди стремились постичь тайну происхождения Вселенной. Возможно, это единственный вопрос, для которого не существует ни культурных, ни временных границ, вдохновляющий фантазии наших первобытных предков и побуждающий современных ученых заниматься космологией. В его основе – жажда всех людей понять, почему существует Вселенная, как она приняла свой современный облик, какие принципы движут ее эволюцией. Поразительно, что сегодня человечество вступило в ту стадию развития, на которой начинает вырисовываться схема, в рамках которой на некоторые вопросы можно будет дать научный ответ.

Согласно общепринятой сегодня теории, в первые моменты эволюции Вселенная находилась в экстремальных условиях огромных энергий, температур и плотностей. Сейчас ясно, что для описания таких условий требуется и общая теория относительности, и квантовая теория, поэтому проблема возникновения Вселенной является хорошим полигоном для применения идей теории суперструн. Вскоре мы рассмотрим эти новые применения, но сначала обсудим космологическую теорию, существовавшую до открытия теории струн, так называемую стандартную космологическую модель.

Стандартная космологическая модель

Современная теория сотворения мира возникла примерно через пятнадцать лет после создания Эйнштейном общей теории относительности. Хотя сам Эйнштейн отказался посмотреть правде в глаза и признать, что из его теории следует невозможность существования вечной и статической Вселенной, за него это сделал Александр Фридман. Как

обсуждалось в главе 3, Фридман нашел так называемое решение Большого взрыва для уравнений Эйнштейна, т. е. решение, в котором Вселенная развивается из начального состояния бесконечного сжатия и в настоящий момент находится в стадии расширения после этого исходного взрыва. Эйнштейн был так уверен в невозможности подобных меняющихся во времени решений его уравнений, что даже опубликовал короткую статью о якобы найденной им грубой ошибке в работе Фридмана. Однако примерно через восемь месяцев Фридману все же удалось убедить Эйнштейна в том, что в действительности никакой ошибки не было; Эйнштейн публично, но кратко, снял свои возражения. Очевидно, однако, что Эйнштейн не считал результаты Фридмана имеющими какое-либо отношение к нашей Вселенной. Однако пять лет спустя кропотливые наблюдения Хаббла за несколькими десятками галактик, проводившиеся с помощью стодюймового телескопа в обсерватории Маунт Вильсон, показали, что Вселенная действительно расширяется. Работа Фридмана, переписанная в более систематическом и удобном виде Говардом Робертсоном и Артуром Уокером, до сих пор является основой современной космологии.

Подробнее современная теория космической эволюции выглядит так. Около 15 миллиардов лет назад Вселенная извергласъ в результате мощного сингулярного взрыва, разметавшего в стороны все пространство и материю. (Можно не искать точку, в которой произошел Большой взрыв: она там, где вы находитесь сейчас, и где находятся все остальные – изначально все различаемые нами отдельные точки пространства находились в одном месте.) Вычисления температуры, которая была у Вселенной лишь спустя 10-43 с после Большого взрыва (так называемое планковское время), приводят к значению порядка 1032 К, что примерно в 1025 раз выше температуры в недрах Солнца. С течением времени Вселенная расширялась и охлаждалась, и в ходе этого процесса в первоначально однородной и горячей первичной космической плазме стали возникать вихри и скопления. Через 10-5 с после Большого взрыва Вселенная достаточно охладилась (примерно до 1013 К, что в миллион раз больше температуры внутри Солнца) для того, чтобы из групп трех кварков стало возможно образование протонов и нейтронов. Примерно через сотую долю секунды условия стали такими, что в охлаждающейся плазме элементарных частиц уже могли формироваться ядра некоторых легких элементов периодической таблицы. В течение следующих трех минут, пока кипящая Вселенная охлаждалась примерно до 109 К, основная доля образовавшихся ядер приходилась на ядра водорода и гелия и включала небольшую добавку дейтерия («тяжелого» водорода) и лития. Этот интервал времени получил название периода первичного нуклеосинтеза.

Затем в течение нескольких сотен тысяч лет было мало событий, кроме дальнейшего расширения и охлаждения. Но в конце этого этапа, когда температура упала до нескольких тысяч градусов, летавшие до этого с бешеной скоростью электроны замедлились до скорости, позволяющей атомным ядрам (в основном, ядрам водорода и гелия) захватывать их, образуя электрически нейтральные атомы. Это явилось поворотным моментом: начиная с него Вселенная, в общем и целом, становится прозрачной. До эры захвата электронов она была заполнена плотной плазмой электрически заряженных частиц, одни из которых (например, ядра) несли положительный заряд, а другие (например, электроны) – отрицательный. Фотоны, взаимодействующие лишь с заряженными частицами, испытывали постоянные пинки и толчки со стороны кишащих заряженных частиц и не могли пролететь достаточно далеко, не будучи отклоненными или поглощенными этими частицами. Из-за таких препятствий свободному движению фотонов, Вселенная предстала бы перед наблюдателем совершенно непрозрачной, подобной густому утреннему туману или снежной буре. Но когда отрицательно заряженные электроны были рассажены по орбитам вокруг положительно заряженных ядер и образовались электрически нейтральные атомы, препятствия исчезли и густой туман рассеялся. С этого момента фотоны от Большого взрыва стали свободно путешествовать по Вселенной, и постепенно она полностью стала доступной взору.

Примерно миллиард лет спустя, когда Вселенная достаточно успокоилась после

неистового начала, из сжатых гравитацией комков первичных элементов стали формироваться галактики, звезды, а затем и планеты. Сегодня, через 15 миллиардов лет после Большого взрыва, мы можем восхищаться как величием космоса, так и нашей способностью построить разумную и экспериментально проверяемую теорию происхождения космоса.

Но до какой степени можно действительно доверять теории Большого взрыва?

Проверка модели Большого взрыва

Изучая Вселенную с помощью мощнейших телескопов, астрономы могут видеть свет, испущенный галактиками и квазарами через несколько миллиардов лет после Большого взрыва. Это позволяет им проверить предсказания теории Большого взрыва о расширении Вселенной вплоть до столь ранних этапов ее эволюции, и результаты всех проверок оказываются положительными. Чтобы проверить теорию для еще более ранних этапов, физики и астрономы вынуждены пользоваться менее прямыми методами. Один из наиболее тонких подходов опирается на понятие реликтового космического излучения.

Если читателю приходилось когда-нибудь ощупывать только что накачанную до предела велосипедную шину, он знает, что шина кажется теплой. Часть энергии, израсходованная на накачку колеса насосом, перешла в теплоту, и температура шины увеличилась. Это есть следствие общего принципа: для широкого класса условий при сжатии тел происходит их нагревание. И наоборот, если не препятствовать расширению, произойдет охлаждение. На этих принципах устроены кондиционеры и холодильники, в которых вещества типа фреона периодически подвергаются сжатию и расширению (сопровождающимся парообразованием и конденсацией), направляя поток теплоты в нужную сторону. Хотя речь идет о простых явлениях земной физики, оказывается, что они обладают глубоким смыслом в космосе как целом.

Выше говорилось о том, что после объединения электронов и ядер в атомы фотоны могут беспрепятственно путешествовать во Вселенной. Это означает, что Вселенная заполнена «газом» фотонов, движущихся во всевозможных направлениях и равномерно распределенных в космическом пространстве. Когда Вселенная расширяется, газ свободно летящих фотонов расширяется вместе с ней, так как Вселенная, по существу, является резервуаром для этого газа. Подобно тому, как температуры более привычных для нас газов (например, воздуха в колесе) понижаются при расширении, температура этого фотонного газа тоже падает при расширении Вселенной. Уже давно, после работ Георгия Гамова и его студентов Ральфа Альфера и Роберта Хермана в 1950-х гг., а также Роберта Дикке и Джима Пиблза в середине 1960-х гг., физики поняли, что современная Вселенная должна быть наполнена почти однородным составом из первичных фотонов, охладившимся до нескольких градусов выше абсолютного нуля за 15 миллиардов лет космического расширения1). В 1965 г. Арно Пензиас и Роберт Вильсон из Лаборатории им. Белла в штате Нью-Джерси случайно сделали одно из важнейших открытий нашей эпохи. Работая с антенной, предназначенной для спутниковой связи, они зарегистрировали послесвечение Большого взрыва! Позднее и теория, и эксперимент были усовершенствованы, и эти исследования завершились измерениями, полученными с помощью спутника COBE (Cosmic Background Explorer, «зонда космического фона») агентства NASA в 1990-е гг. На основе полученных данных физики и астрономы точно установили, что Вселенная действительно заполнена микроволновым излучением с температурой примерно на 2,7 К выше абсолютного нуля (если бы наши глаза были чувствительны к микроволнам, мы увидели бы рассеянное свечение вокруг нас), что в точности совпадает с предсказаниями теории Большого взрыва. Более точно, в каждом кубическом метре Вселенной (включая тот объем, который вы сейчас занимаете) находится около 400 миллионов фотонов, образующих огромное космическое море микроволнового излучения – эхо сотворения. Часть «снега» на экране телевизора, когда вы переключаетесь на канал, на котором закончилось вещание, объясняется именно этим туманным откликом

Большого взрыва. Согласие между теорией и экспериментом служит подтверждением космологической картины Большого взрыва до момента времени, когда фотоны начали свободное движение по Вселенной, т. е. примерно до нескольких сотен тысяч лет после Большого взрыва.

Можно ли в наших исследованиях теории Большого взрыва продвинуться еще дальше вглубь времен? Можно. Используя законы обычной ядерной физики и термодинамики, можно сделать определенные предсказания об относительном проценте легких элементов, образованных во время первичного нуклеосинтеза, т. е. в период примерно от сотых долей секунды до нескольких минут после Большого взрыва. Например, теория говорит о том, что Вселенная примерно на 23 % должна состоять из гелия. Измерения содержания гелия в звездах и туманностях действительно подтверждают это предсказание. Возможно, еще более впечатляющим является подтверждение предсказания о содержании дейтерия, так как его малое, но ощутимое присутствие в космосе не может объясняться никакими другими астрофизическими явлениями, кроме Большого взрыва. Подтверждение этих предсказаний, а также более позднее подтверждение предсказания содержания лития говорят об успешной проверке гипотез о физике ранней Вселенной вплоть до момента первичного синтеза.

Все это настолько впечатляет, что хочется возгордиться успехами. Все данные, которыми мы располагаем, подтверждают космологическую теорию, описывающую эволюцию Вселенной от сотых долей секунды после Большого взрыва до настоящего времени, отделенного от начала интервалом времени в 15 миллиардов лет. Однако не следует забывать о том, что новорожденная Вселенная развивалась с феноменальной скоростью. Мельчайшие доли секунды, гораздо меньшие сотых долей, суть космические эпохи, в течение которых формировались кажущиеся нам неизменными свойства окружающего мира. Поэтому физики продолжали движение вперед, пытаясь объяснить, что происходило во Вселенной в еще более ранние моменты. Так как при движении вспять во времени Вселенная становится все горячее, меньше и плотнее, все очевиднее потребность в квантовом описании материи и взаимодействий. Как мы видели с других точек зрения в предыдущих главах, квантовая теория поля точечных частиц справедлива лишь тогда, когда средние энергии частиц не превышают планковскую энергию. С точки зрения космологии этот предел соответствует моменту, когда вся окружающая нас Вселенная была сжата до размера мельчайшего зерна планковских размеров, а плотность была так высока, что сложно подыскать подходящую метафору, которая проиллюстрировала бы эту ситуацию: плотность Вселенной в эти моменты времени была просто колоссальной. При таких энергиях и плотностях гравитация и квантовая теория уже не могут рассматриваться как две различных сущности, каковыми они являлись в квантовой теории поля точечных частиц. Вместо этого – и в этом состоит смысл содержания данной книги – анализ должен базироваться на теории струн. На временной шкале такие энергии и плотности соответствуют точкам, удаленным от Большого взрыва менее чем на планковское время 10-43 с, следовательно, эта сверхранняя эпоха является космологической ареной теории струн.

Мы начнем экскурсию в эту эпоху с обсуждения предсказаний стандартной космологической модели о Вселенной в моменты времени, меньшие сотых долей секунды, но большие планковского времени.

От планковских времен до сотых долей секунды после Большого взрыва

Вспомним из главы 7 (обратите особое внимание на рис. 7.1), что в раскаленной среде ранней Вселенной три негравитационных взаимодействия оказываются связанными воедино. Расчеты зависимости силы этих взаимодействий от энергии и температуры показывают, что до моментов примерно через 10-35 с после Большого взрыва сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия были одним «великим объединенным» взаимодействием. В этом состоянии Вселенная была гораздо более симметричной, чем сейчас. Подобно тому,

как при плавке нескольких предметов из различных металлов получается однородная расплавленная смесь, при огромных температурах и энергиях ранней Вселенной все наблюдаемые различия между этими взаимодействиями пропадали. Но по мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась, такая симметрия, как следует из формализма квантовой теории поля, разрушалась довольно резкими скачками и, в конце концов, привела к знакомой нам сравнительно асимметричной форме.

Нетрудно понять физический смысл этого понижения или нарушения симметрии, как его называют физики. Когда в резервуаре равномерно распределены молекулы H2O, вода выглядит одинаково вне зависимости от того, под каким углом на нее смотреть. Рассмотрим, однако, что происходит при уменьшении температуры. Сначала все выглядит как обычно. На микроскопических масштабах уменьшается средняя скорость молекул воды – только и всего. Однако при понижении температуры до 0° C внезапно происходят радикальные перемены. Жидкая вода замерзает и превращается в лед. Как обсуждалось в предыдущей главе, это простой пример фазового перехода. Но сейчас для нас важно то, что при уменьшении температуры происходит уменьшение симметрии, которую проявляют молекулы H2O. В то время как жидкая вода выглядит одинаково под любым углом наблюдения, демонстрируя симметрию относительно вращений, твердый лед выглядит совершенно иначе. Он обладает кристаллической структурой, т. е. если исследовать лед с должной точностью, он, как и любой кристалл, будет выглядеть по-разному при наблюдении под разными углами. Фазовый переход приводит к явному уменьшению вращательной симметрии.

И хотя мы рассмотрели лишь один знакомый пример, это утверждение справедливо в более общем случае: при понижении температуры во многих физических системах происходит фазовый переход, который обычно сопровождается уменьшением или «нарушением» некоторых исходных симметрии системы. В действительности система может испытывать последовательность фазовых переходов при изменении температуры в достаточно широких пределах. Простейшим примером снова служит вода. При температурах выше 100° C она представляет собой газ (пар). В этом состоянии у системы даже больше симметрии, чем в жидком, так как в этом случае молекулы H2O не связаны вместе в одну плотную жидкую упаковку, а предоставлены сами себе. Все они равноправны и носятся по всему резервуару, не образуя скоплений или групп, по которым молекулы можно было бы различать исходя из близости к соседям. При высоких температурах господствует полная демократия и симметрия. При понижении температуры за 100-градусную отметку, естественно, начинают формироваться капли, и симметрия уменьшается. Дальнейшее понижение температуры не приводит к серьезным последствиям, пока не перейдена нулевая отметка, и в этот момент происходит фазовый переход из жидкости в лед, который также сопровождается резким уменьшением симметрии.

По мнению физиков, в моменты между планковским временем и сотыми долями секунды после Большого взрыва Вселенная вела себя аналогичным образом, испытав, по крайней мере, два подобных фазовых перехода. При температурах выше 1028 K все три негравитационные взаимодействия кажутся единым взаимодействием. Ситуация максимально симметрична. (В конце главы обсуждается как с помощью теории струн можно включить в этот высокотемпературный союз гравитационное взаимодействие.) Однако при понижении температуры ниже черты 1028 K во Вселенной происходит фазовый переход, при котором три силы природы выкристаллизовываются по-разному в разные типы взаимодействий. Их относительные величины и детали того, как они воздействуют на материю, начинают различаться. Очевидная при высоких температурах симметрия этих взаимодействий разрушается при охлаждении Вселенной. Однако, как показали Вайнберг, Салам и Глэшоу (см. главу 5), пропадает не вся высокотемпературная симметрия: между слабыми и электромагнитными взаимодействиями сохраняется глубокая связь. По мере дальнейшего понижения температуры ничего необычного не происходит до отметки 1015 K (в 100 миллионов раз больше температуры Солнца), когда во Вселенной происходит еще один переход, разъединяющий электромагнитные и слабые взаимодействия. Они тоже

обособляются, разрушая более симметричный союз, и различие между ними растет с понижением температуры Вселенной. Этими двумя фазовыми переходами определяется наличие трех разных типов негравитационного взаимодействия, хотя приведенный обзор истории Вселенной говорит об их близком родстве.

Космологическая загадка

Рассмотренная космология пост-планковской эры дает элегантный, самосогласованный и пригодный для вычислений формализм, позволяющий понять структуру, которую имела Вселенная через малые доли секунды после Большого взрыва и вплоть до нашего времени. Но, как это обычно бывает с удачными теориями, новые результаты приводят ко все более обстоятельным вопросам. Оказывается, что некоторые из этих вопросов, не умаляя важности представленного стандартного космологического сценария, все же высвечивают ряд нелепостей, вызывающих необходимость создания более глубокой теории. Остановимся на одной из них, так называемой проблеме горизонта, являющейся одним из важнейших вопросов современной космологии.

Скрупулезные исследования реликтового излучения показывают, что с точностью до тысячной доли процента температура излучения одинакова для всех точек неба, на которые направлена измерительная антенна. Если немного задуматься над этим фактом, он может показаться странным. С какой стати температуры различных точек Вселенной, разделенных огромными расстояниями, должны совпадать так точно? Напрашивается естественное на первый взгляд разрешение парадокса: не важно, что эти точки находятся сегодня в диаметрально противоположных областях неба, подобно разлученным близнецам, они (как и все остальные точки) находились очень близко друг к другу в первые моменты после Большого взрыва. И так как все области образовались из общей начальной точки, совсем не удивительно, что у них одни и те же физические характеристики, в частности их температура.

В стандартной космологии Большого взрыва это объяснение не годится. И вот почему. Тарелка горячего супа постепенно охлаждается до комнатной температуры, так как она соприкасается с более холодным воздухом. Но если суп находится в термосе, он, разумеется, останется горячим гораздо дольше, так как его контакт с окружающей средой намного слабее. Это говорит о том, что выравнивание температур двух тел происходит при длительном и беспрепятственном контакте. Поэтому для проверки того, что ныне далеко удаленные области должны иметь одинаковые температуры из-за их исходного контакта, нужно оценить интенсивность обмена между ними на ранней стадии эволюции Вселенной. Здесь тоже можно сначала предположить, что из-за непосредственной близости в начальные моменты контакт между областями был даже еще сильнее. Однако пространственная близость – это только полдела. Вторая половина – это длительность контакта.

Чтобы лучше разобраться в этой ситуации, представим себе, что мы смотрим фильм, в котором запечатлено космическое расширение, но пленку крутят в обратную сторону, и мы возвращаемся в прошлое к моменту Большого взрыва. Так как скорость передачи любого сигнала или любых характеристик ограничена скоростью света, обмен тепловой энергией между материей в двух областях пространства, приводящий к выравниванию температур, может происходить лишь тогда, когда расстояние между областями в данный момент меньше, чем расстояние, которое мог бы пройти свет с момента Большого взрыва. И теперь, прокручивая назад пленку, мы видим, что существует соревнование между расстоянием, которым разделены две области, и временем, на которое нужно повернуть назад часы, чтобы эти области оказались объединенными вместе. Например, если для разделения областей на 300 000 км мы должны отмотать пленку до момента времени, меньшего одной секунды после Большого взрыва, то, несмотря на близость областей в тот момент, у них не будет возможности для контакта, ибо свету нужна целая секунда, чтобы пройти это расстояние2). Если расстояние гораздо меньше, например 300 км, но для этого пленку нужно промотать до

момента времени, меньшего тысячной доли секунды после Большого взрыва, вывод тот же: эти области не могут влиять друг на друга, так как свет не сможет преодолеть эти 300 км менее чем за тысячную доли секунды. И так далее: если расстояние равно 30 см, но требуется промотать пленку до момента, меньшего миллиардной доли секунды, влияние снова невозможно. Пример демонстрирует, что из непосредственной близости двух точек в первые моменты после Большого взрыва не обязательно следует то, что между ними, как между супом и воздухом, возможен тепловой контакт, необходимый для выравнивания температур.

Физики обнаружили, что та же проблема возникает и в модели Большого взрыва. Детальные расчеты показывают, что для областей пространства, разделенных сейчас огромными расстояниями, не было возможности обмена тепловой энергией в ранние моменты времени, которым объяснялось бы равенство их температур сейчас. А так как слово горизонт относится к кругу видимых нами объектов, образно говоря, к точкам, куда может дойти свет, физики назвали неожиданную однородность температур в космических просторах «парадоксом горизонта». Он не означает, что стандартная космологическая модель неверна. Но однородность температур говорит о том, что в описании космологии не достает какой-то важной детали. В 1979 г. физик Алан Гут, работающий сейчас в Массачусетском технологическом институте, дописал недостающую главу.

Инфляция

Причина возникновения парадокса горизонта заключается в том, что для сближения двух удаленных областей Вселенной приходится прокручивать пленку фильма о космической эволюции назад во времени. Так далеко назад, что для передачи какого-либо физического воздействия времени остается слишком мало. И проблема возникает из-за того, что при обратной прокрутке к моменту Большого взрыва Вселенная сжимается недостаточно быстро.

Конечно, это лишь грубая идея, так что имеет смысл рассмотреть вопрос чуть подробнее. Эффект, вызывающий парадокс горизонта, подобен замедлению брошенного вверх мяча: под действием гравитационного притяжения скорость расширения Вселенной уменьшается. Из этого, в частности, следует, что для сокращения расстояния между двумя точками вдвое необходимо прокрутить пленку не к середине отрезка от начала фильма, а еще ближе к началу. В свою очередь, чтобы уменьшить вполовину пространственное разделение, придется более чем вполовину разделить время с момента Большого взрыва. Чем меньше времени прошло с момента Большого взрыва, тем меньше возможности для передачи воздействия между двумя областями, несмотря на то, что эти области будут ближе друг к другу.

Теперь несложно дать объяснение парадокса горизонта, предложенное Гутом. Он нашел другое решение уравнений Эйнштейна, в котором ранняя Вселенная проходит очень короткий этап чрезвычайно быстрого расширения, внезапно раздуваясь по экспоненциальному закону. В отличие от примера с мячом, замедляющимся при движении вверх, при экспоненциальном законе скорость расширения увеличивается. Если теперь прокручивать назад нашу пленку, то ускоренное расширение станет замедленным сжатием. Поэтому для сокращения расстояния вдвое (в период экспоненциальной эры) понадобится прокрутить пленку меньше, чем до середины отрезка с начала фильма, на самом деле гораздо меньше. Меньшая обратная прокрутка означает, что у двух областей будет больше времени на тепловой контакт и у них, как у супа и воздуха, будет достаточно времени, чтобы выровнять температуры. После открытия Гута и последовавших важных усовершенствований Андрея Линде, работающего ныне в Стенфордском университете *(в то время Андрей Линде работал в Физическом институте АН СССР. – Прим. ред.)* , Пола Стейнхарда и Андреаса Альбрехта, работавших в то время в университете штата Пенсильвания, а также многих других физиков, стандартная космологическая модель была

переформулирована в инфляционную космологическую модель. Этот подход внес поправки в стандартную модель, изменяющие ее поведение на крайне малом временном отрезке примерно от 10-36 до 10-34 с после Большого взрыва. В рамках новой модели Вселенная подверглась колоссальному расширению минимум в 1030 раз, а не в сотню раз, как в стандартной схеме. За этот мизерный отрезок времени после Большого взрыва размер Вселенной увеличился больше, чем за все последующие 15 миллиардов лет. До начала такого расширения материя, разделенная сейчас огромными пространствами, была гораздо ближе, чем это предсказывает стандартная космологическая модель, так что температура легко могла сравняться. Затем, в ходе молниеносной космологической инфляции по Гуту и в ходе последовавшего обычного расширения согласно стандартной модели области пространства, где находилась эта материя, могли разойтись на громадные наблюдаемые нами сейчас расстояния. Таким образом, модификация стандартной космологической модели на очень коротком отрезке времени, приводящая, однако, к очень серьезным последствиям, позволяет разрешить парадокс горизонта (а также ряд других важных проблем, которые здесь не описаны). Новая теория получила широкое признание теоретиков, занимающихся космологией3).

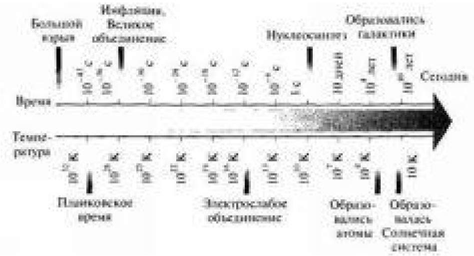

Рис. 14.1. Временная шкала эволюции и ключевые моменты в истории Вселенной.

Итак, согласно современной теории, эволюция Вселенной на временном интервале от момента сразу за планковским временем до настоящего времени выглядит так, как показано на рис. 14.1.

Космология и теория суперструн

Нам осталось выяснить, что происходит на коротком отрезке времени от момента Большого взрыва до планковского времени на рис. 14.1. Если непосредственно применять уравнения общей теории относительности к этой области, они будут свидетельствовать о том, что по мере приближения к моменту Большого взрыва Вселенная продолжает сжиматься, а ее температура и плотность продолжают увеличиваться. В нулевой момент времени размер Вселенной становится равным нулю, а температура и плотность обращаются в бесконечность, и это явный признак того, что данная теоретическая модель Вселенной, прочно базирующаяся на классическом описании гравитации в общей теории относительности, теряет всякий смысл.

Природа настойчиво указывает, что при таких условиях мы должны объединить общую теорию относительности с квантовой теорией, другими словами, использовать теорию струн. В настоящее время космологические исследования в рамках теории струн находятся на раннем этапе развития. Методы теории возмущений могут, в лучшем случае, дать самое смутное представление о происходящем, так как анализ экстремальных энергий, температур и плотностей требует большей точности. И хотя в ходе второй революции в теории суперструн были предложены методы, позволяющие обойти теорию возмущений, пройдет некоторое время до того, как эти методы будут достаточно развиты, и их можно будет применять к расчетам космологических эффектов. Однако, как мы сейчас обсудим, в последнее десятилетие физики уже сделали первые шаги к пониманию струнной космологии. Вот что они обнаружили.

Оказывается, есть три важнейших пункта, в которых теория струн модифицирует стандартную космологическую модель. Во-первых, в духе современных исследований, все

более проясняющих ситуацию, из теории струн следует, что Вселенная должна иметь минимально допустимый размер. Этот вывод оказывает огромное влияние на наше понимание структуры Вселенной в сам момент Большого взрыва, для которого в стандартной модели получается нулевой размер Вселенной. Во-вторых, понятие дуальности малых и больших радиусов (в его тесной связи с существованием минимального размера) в теории струн, как мы вскоре увидим, крайне важно и в космологии. И, наконец, число пространственно-временных измерений в теории струн больше четырех, поэтому космология должна описывать эволюцию всех этих измерений. Обсудим эти три пункта более подробно.

В начале был комок планковских размеров

В конце 1980-х гг. Роберт Бранденбергер и Кумрун Вафа сделали первые важные шаги к пониманию того, к каким изменениям в следствиях из стандартной космологической модели приведет использование теории струн. Они пришли к двум важным выводам. Во-первых, по мере движения назад к моменту Большого взрыва температура продолжает расти до момента, когда размеры Вселенной по всем направлениям сравняются с планковской длиной. Но в этот момент температура достигнет максимума и начнет уменьшаться. На интуитивном уровне нетрудно понять причину этого явления. Предположим для простоты (следуя Бранденбергеру и Вафе), что все пространственные измерения Вселенной циклические. При движении назад во времени радиус каждой окружности сокращается, а температура Вселенной увеличивается. Но из теории струн мы знаем, что сокращение радиусов сначала до и затем ниже значений планковской длины физически эквивалентно уменьшению радиусов до планковской длины, сменяющемуся затем их последующим увеличением. А так как температура при расширении Вселенной падает, то безрезультатные попытки сжать Вселенную до размеров, меньших планковской длины, приведут к прекращению роста температуры и ее дальнейшему снижению. Подробные вычисления Бранденбергера и Вафы подтверждают, что так оно и происходит на самом деле.

В результате Бранденбергер и Вафа пришли к следующей космологической картине: сначала все пространственные измерения в теории струн плотно свернуты до минимальных размеров, грубо говоря, до планковской длины. Температура и энергия высоки, но не бесконечны: парадоксы начальной точки нулевого размера в теории струн решены. В начальный момент существования Вселенной все пространственные измерения теории струн совершенно равноправны и полностью симметричны: все они свернуты в многомерный комок планковских размеров. Далее, согласно Бранденбергеру и Вафе, Вселенная проходит первую стадию понижения симметрии, когда в планковский момент времени три пространственных измерения отбираются для последующего расширения, а остальные сохраняют исходный планковский размер. Затем эти три измерения отождествляются с измерениями в сценарии инфляционной космологии и в процессе эволюции, изображенной на рис. 14.1, принимают наблюдаемую ныне форму.

Почему три?

Здесь сразу же возникает вопрос: в чем причина того, что при понижении симметрии для расширения отбираются ровно три пространственных измерения? Иными словами, кроме имеющегося экспериментального факта, что лишь три пространственных измерения расширились до наблюдаемого огромного размера, есть ли в теории струн фундаментальный принцип, объясняющий почему не расширилось никакое другое число измерений (четыре, пять, шесть и т.д.) или даже, что более симметрично, все пространство? Бранденбергер и Вафа предложили возможное объяснение. Вспомним, что дуальность больших и малых радиусов в теории струн основана на том, что если измерение является циклическим, на него может наматываться струна. Бранденбергер и Вафа осознали, что такие намотанные струны могут сдерживать расширение измерений, на которые они намотаны, подобно резиновым

лентам, обернутым вокруг велосипедной камеры. С первого взгляда может показаться, что в результате все измерения будут скованы, так как струны могут наматываться, и наматываются, на любое из них. Но тут есть лазейка: если намотанная струна вдруг встретит своего анти-струнного партнера (грубо говоря, струну, намотанную в другом направлении), обе струны моментально аннигилируют и образуют ненамотанную струну. Если этот процесс будет достаточно активным, то будет уничтожено достаточно много «резиновой ленты», и измерения смогут расширяться. Бранденбергер и Вафа предположили, что снижение сдерживающего действия намотанных струн может иметь место лишь в случае трех пространственных измерений. И вот почему.

Представим себе две частицы, которые катятся по одномерной линии, подобной пространственному измерению Линляндии. За исключением случая, когда их скорости равны, рано или поздно одна из частиц догонит другую, и они столкнутся. Заметим, однако, что если те же точечные частицы будут двигаться по двумерной поверхности, весьма вероятно, что столкновение никогда не произойдет. Второе пространственное измерение открывает окно в новый мир траекторий каждой частицы, и большинство траекторий двух миров не пересекаются в одной и той же точке в один момент времени. В трех, четырех или большем числе измерений становится все менее вероятно, что частицы когда-либо столкнутся. Бранденбергер и Вафа поняли, что аналогичное утверждение справедливо, если заменить точечные частицы струнными петлями, намотанными вокруг пространственных измерений. И хотя их вывод гораздо сложнее представить себе наглядно, но в трех (или менее) циклических пространственных измерениях две намотанные струны, скорее всего, столкнутся, как две точечные частицы в одном измерении. Но в четырех и в большем числе измерений вероятность столкновения двух намотанных струн уменьшается, как и в случае частиц в двух и большем числе измерений4).

Вырисовывается следующая картина. В первый момент существования Вселенной в неразберихе высоких, но конечных температур все циклические измерения пытаются расшириться. Намотанные струны их сдерживают в границах исходных планковских размеров. Однако рано или поздно случайная температурная флуктуация приведет к тому, что три из этих измерений станут больше других и, согласно нашему обсуждению, вероятность столкновения намотанных вокруг этих измерений струн резко увеличится. Примерно в половине этих столкновений будут участвовать пары струна/антиструна, и такие пары аннигилируют, значительно ослабляя сдерживающую силу и позволяя этим трем измерениям расширяться все больше. А чем больше они расширяются, тем менее вероятно, что их обмотают другие струны, так как для этого от струн будет требоваться все больше энергии. Таким образом, расширение подстегивается само собой, и при увеличении размеров становится все меньше препятствий к дальнейшему расширению. Теперь мы можем представить, что эти три пространственных измерения будут эволюционировать по описанному выше сценарию и достигнут размеров наблюдаемой Вселенной.

Космология и вид пространств Калаби-Яу

Для простоты Бранденбергер и Вафа считали все пространственные измерения циклическими. Это допущение оправдано. Как отмечалось в главе 8, если циклические измерения достаточно велики и замыкаются на себя за границами современных возможностей наблюдения, циклической вид совместим с видом наблюдаемой нами Вселенной. Но для измерений, размер которых остается малым, более реалистичный исход заключается в их свертывании в более сложное пространство Калаби-Яу. Ключевой вопрос, безусловно, в том, в какое именно пространство. Каким образом осуществляется выбор конкретного пространства? Никому не удалось пока что на это ответить. Однако, объединяя результаты об изменении топологии, описанные в предыдущей главе, с подобными космологическими прозрениями, можно предложить схему ответа на данный вопрос. Мы знаем, что многообразия Калаби-Яу можно связать друг с другом посредством конифолдных

переходов с разрывом пространства. Можно представить себе, что в моменты хаоса и огромных температур после Большого взрыва свернутые компоненты пространства Калаби-Яу остаются малыми, но участвуют в безумном карнавале стремительных превращений, принимая облик различных пространств Калаби-Яу в процессе беспрестанных разрывов и восстановлений ткани пространства. По мере

того как Вселенная охлаждается, а три измерения становятся все больше, переходы от одного пространства Калаби-Яу к другому происходят реже и дополнительные измерения в конце концов упаковываются в определенное многообразие Калаби-Яу, предположительно ответственное за физические свойства наблюдаемого нами мира. Дело чести для физиков – подробно описать эволюцию компоненты Калаби-Яу нашего пространства, чтобы современный ее вид можно было вывести из теоретических принципов. Мы видим, что с учетом новых результатов о возможности непрерывного преобразования пространств Калаби-Яу друг в друга выбор одного многообразия Калаби– Яу из множества других может, на самом деле, быть сведен к задаче из космологии5'.

До начала?

Так как точные уравнения теории струн неизвестны, Бранденбергеру и Вафе пришлось делать немало допущений и приближений в своих космологических исследованиях. Недавно Вафа сказал: «В нашей работе показано, что теория струн позволяет по-новому подойти к давним проблемам стандартного подхода п космологии. Мы видим, например, что в теории струн можно искоренить само понятие исходной сингулярности. Однако на современном уровне понимания теории струн выполнить абсолютно надежный расчет для таких экстремальных условий очень сложно, и наша работа дает лишь первое представление о струнной космологии, очень далекое от окончательного понимания»6).

После этой работы физики непрерывно продвигаются вперед к пониманию струнной космологии. В числе тех, кто идет во главе этих исследований – Габриэле Венециано и его коллега Маурицио Гасперини из Туринского университета. Эти ученые представили свой, очень красивый, вариант струнной космологии, который в ряде мест соприкасается с описанным выше сценарием, но в других местах принципиально отличается от него. Как Бранденбергер и Вафа, для исключения бесконечной температуры и плотности энергии, которые возникают в стандартной и инфляционной модели, они опирались на существование минимальной длины в теории струн. Однако вместо вывода о том, что в силу этого свойства Вселенная рождается из комка планковских размеров, Гасперини и Венециано предположили, что существовала доисторическая Вселенная, родившаяся задолго до момента, который мы называем нулевой точкой, и зачавшая этот космический эмбрион планковских размеров.

Исходное состояние Вселенной в таком сценарии и в модели Большого взрыва очень сильно различаются. Согласно Гасперини и Венециано, Вселенная не являлась раскаленным и плотно скрученным клубком измерений, а была холодной и имела бесконечную протяженность. Затем, как следует из уравнений теории струн, во Вселенную вторглась нестабильность, и все ее точки стали, как и в эпоху инфляции по Гуту, стремительно разбегаться в стороны. Гасперини и Венециано показали, что из-за этого пространство становилось все более искривленным и в результате произошел резкий скачок температуры и плотности энергии7'. Прошло немного времени, и трехмерная область миллиметровых размеров внутри этих бескрайних просторов преобразилась в раскаленное и плотное пятно, тождественное пятну, которое образуется при инфляционном расширении по Гуту. Затем все пошло по стандартному сценарию космологии Большого взрыва, и расширяющееся пятно превратилось в наблюдаемую Вселенную. И так как в эпоху до Большого взрыва происходило свое инфляционное расширение, решение парадокса горизонта, предложенное Гутом, оказывается автоматически встроенным в этот космологический сценарий. По выражению Венециано, «теория струн преподносит нам, как на блюдечке, вариант

инфляционной космологии»8).

Изучение струнной космологии быстро становится областью активных и продуктивных исследований. Например, сценарий эволюции до Большого взрыва уже не раз был поводом горячих, но плодотворных споров, а его место в будущей космологической формулировке, к которой мы, в конце концов, придем в рамках теории струн, далеко не очевидно. Однако нет сомнений, что эта космологическая формулировка будет твердо опираться на понимание физиками результатов, открытых во время второй революции суперструн. Например, сейчас еще не ясны космологические следствия существования многомерных мембран, или то, как изменятся рассмотренные законы космологии, если окажется, что значения констант связи в теории струн соответствуют центральным областям рис. 12.11, а не одному из полуостровов на этой карте. Иными словами, как изменит наше понимание первых моментов существования Вселенной анализ законченной М-теории? Эти важнейшие вопросы сейчас интенсивно исследуются. И уже появился один важный результат.

М-теория и слияние всех сил природы

На рис. 7.1 показано, что все три негравитационные взаимодействия сливаются воедино, если температура Вселенной достаточно велика. Как можно вписать в эту картину гравитационное взаимодействие? До открытия М-теории теоретикам удалось показать, что для простейших выборов компоненты Калаби-Яу гравитационное взаимодействие почти, но не полностью, сливается с тремя другими (рис. 14.2).

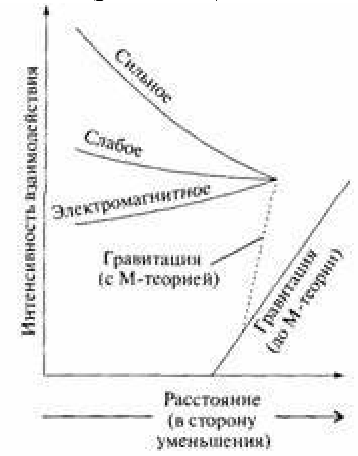

Рис. 14.2. В М-теории все четыре типа взаимодействий объединяются естественным образом.

Теоретики обнаружили, что несогласование можно устранить, слегка «подогнав» выбранное многообразие Калаби-Яу и выполнив серию математических трюков, но подобные тонкие настройки задним числом всегда вызывают у физиков ощущение дискомфорта. Так как сейчас никто не способен точно предсказать вид измерений Калаби-Яу, полагаться на решения проблем, столь чувствительные к детальному описанию этих измерений, довольно рискованно.

Однако Виттен показал, что результаты второй революции в теории суперструн приводят к более надежному решению. Исследуя то, как меняются силы взаимодействий в областях, где константа связи струны может быть большой, Виттен обнаружил, что кривую гравитационного взаимодействия можно слегка изменить без какой-либо особой подгонки пространства Калаби-Яу, и она соединится с кривыми других взаимодействий, как показано на рис. 14.2. И хотя очень рано делать окончательные выводы, этот факт может быть признаком того, что единства в космологическом описании достичь проще, если работать в более общем формализме М-теории.

Результаты, рассмотренные в этом и предыдущих пунктах, являются первыми пробными шагами к пониманию космологических следствий теории струн и М-теории. Физики ожидают новых глубоких результатов в недалеком будущем, когда будут усилены и

применены к решению космологических проблем методы теории струн/М-теории, не опирающиеся на теорию возмущений.

Но так как сегодня эти методы недостаточно эффективны для того, чтобы с их помощью можно было понять космологию на основе теории струн, стоит обсудить некоторые общие соображения о возможной роли космологии в поисках окончательной теории. Нужно предупредить читателя, что некоторые из этих соображений имеют более гипотетический характер, чем те, что описывались выше, однако эти соображения позволяют поставить вопросы, с которыми в будущем может столкнуться любая окончательная теория, какой бы она ни оказалась.

Рассуждения о космологии и окончательная теория

Космология оказывает на нас глубочайшее, почти гипнотическое, воздействие. Понимание того, как все происходило в начале, является, по крайней мере для некоторых из нас, наиболее близким прикосновением к тайне того, почему все это началось. Здесь не утверждается, что современная наука устанавливает связь между вопросом «Как?», и вопросом «Почему?» – она этого не делает, и вполне может оказаться, что подобная научная связь никогда не будет установлена. Но космология держит свое слово и постепенно ведет нас к наиболее полному пониманию арены действия «почему» – к пониманию рождения Вселенной. И это, по крайней мере, позволяет нам развивать научный подход, в рамках которого такие вопросы могут ставиться. Иногда глубокая осведомленность в вопросе – лучшая замена отсутствующего ответа.

В процессе поисков окончательной теории эти высокопарные фразы уступают место более конкретным соображениям. Наше сегодняшнее видение Вселенной, безусловно, зависит от фундаментальных законов физики, но может зависеть и от факторов космической эволюции (т. е. от того, что находится слева на рис. 14.1), и, вообще говоря, может лежать за рамками обсуждения даже самой фундаментальной теории, описывающей то, что находится на этом рисунке на самом правом крае.

В этом несложно убедиться. Рассмотрим, например, что происходит при бросании мяча. Его движение будет определяться законами гравитации, но, пользуясь лишь этими законами, нельзя предсказать, где упадет мяч. Нам также нужно знать величину и направление его скорости в момент броска. Иначе говоря, мы должны знать начальные условия. Во Вселенной также возможны аналогичные исторические взаимосвязи: то, почему звезда образовалась в одном месте, а планета в другом, определяется сложной цепью событий.

По крайней мере, в принципе, эту цепь можно раскрутить назад во времени, и объяснить определенным событием при рождении Вселенной. Возможно, однако, что и более фундаментальные свойства Вселенной, например фундаментальные свойства частиц материи или частиц, передающих взаимодействие, могут прямо зависеть от эволюции, которая, в свою очередь, зависит от начальных условий во Вселенной.

В самом деле, мы уже упоминали об одном возможном воплощении этой идеи в теории струн. В процессе эволюции ранней Вселенной дополнительные измерения могли трансформироваться от одного вида к другому и в конце концов, когда температура достаточно спала, принять вид одного конкретного пространства Калаби-Яу. Но, как и в случае брошенного мяча, результат многочисленных изменений пространств Калаби-Яу может зависеть и от конкретных условий в начале этого процесса. А так как вид окончательного многообразия Калаби– Яу влияет на массы частиц и свойства взаимодействий, то космологическая эволюция и состояние в момент рождения Вселенной сильно влияют на наблюдаемые сегодня физические явления.

Мы не знаем, какими были начальные условия во Вселенной. У нас даже нет идей, понятий и языка, которые нужно использовать для их описания. По нашему мнению, безумные начальные условия с бесконечной энергией, плотностью и температурой в

стандартной и инфляционной моделях есть признак того, что эти модели неверны и дают неправильное описание действительно существовавших начальных условий. Теория струн позволяет улучшить описание, доказывая, что такие экстремальные условия можно обойти. Однако ни у кого так и нет ответа на вопрос, как все начиналось на самом деле. Недостаточность наших знаний распространяется даже на более грубый уровень: мы не знаем, можно ли вообще ставить вопрос об определении начальных условий, или будет ли этот вопрос всегда лежать за рамками любой теории, и задавать его столь же бессмысленно, сколь бессмысленно пытаться с помощью теории относительности пролить свет на то, с какой силой бросили мяч. Некоторые физики, такие как Хокинг и Джеймс Хартл из Калифорнийского университета, предпринимали отчаянные попытки направить вопрос о начальных космологических условиях в русло теоретической физики, но все эти попытки заканчивались плачевно. В настоящее время наш уровень понимания космологии в контексте теории струн/М-теории слишком примитивен для того, чтобы определить, достоин ли кандидат на «теорию всего» своего высокого предназначения, и определяются ли в его рамках начальные космологические условия, которые могут быть возведены затем в ранг физических законов. Это – главная тема будущих исследований.

Однако, даже безотносительно от проблемы начальных условий и их влияния на последующие зигзаги космической эволюции, в последнее время высказываются спекулятивные предположения о том, что существуют и другие потенциальные ограничения на способность объяснения мира любой окончательной теорией. Неизвестно, верны эти предположения или нет; на современном уровне развития науки это, разумеется, не важно. Однако сам факт провоцирует умозрительные доводы о том, что в любой окончательной теории могут возникнуть серьезные препятствия.

Идея основана на следующей возможности. Представим себе, что то, что мы называем нашей Вселенной, есть лишь крошечная часть гораздо более широких космологических просторов, один из бесчисленного множества островов грандиозного космологического архипелага вселенных. Конечно, такое предположение может показаться искусственным (и оказаться, в конце концов, неверным), но существует конкретный механизм, который приводит к такой ситуации. Этот механизм был предложен Андреем Линде, обнаружившим, что рассмотренный выше резкий и кардинальный взрыв с инфляционным расширением мог быть не однократным. Напротив, согласно Линде, условия для возникновения инфляционного расширения могли создаваться многократно в рассеянных по пространству изолированных областях, каждая из которых затем проходила свою стадию расширения и формировала свою вселенную. И в каждой из этих вселенных процесс продолжается: в удаленных областях старых вселенных появляются ростки новых, и паутина расширяющихся вселенных продолжает разрастаться до бесконечности. Терминология становится немного громоздкой, но в духе веяний моды, дадим этому существенно обобщенному понятию вселенной название мульти-вселенная *(в оригинале multiverse (в противовес universe). – Прим. ред.)* , а компоненты мульти-вселенной будем называть вселенными.

Важно отметить, что из утверждения главы 7 о единстве и согласованности законов физики во всей нашей Вселенной не следует то, что на эти законы будут влиять законы физики в других вселенных, коль скоро эти вселенные отделены от нашей или, по крайней мере, находятся так далеко, что свет из этих вселенных еще не дошел до нас. Поэтому можно допустить, что физика в разных вселенных разная. В некоторых вселенных различия могут быть небольшими. Например, масса электрона или константа связи сильных взаимодействий могут отличаться на тысячные доли процента. В других вселенных могут быть более существенные различия. Например, «-кварк может весить в 10 раз больше, чем «-кварк в нашей Вселенной, а электромагнитное взаимодействие может быть в 10 раз сильнее, чем у нас, со всеми вытекающими последствиями для жизни звезд и для свойств окружающего мира, рассмотренных в главе 1. Наконец, могут быть вселенные, разительно отличающиеся от нашей: набор элементарных частиц и взаимодействий может быть совершенно иным; даже число протяженных измерений может отличаться. Для некоторых вселенных это число

может быть равно нулю или единице, а для других – восьми, девяти или даже десяти. Если дать волю фантазии, даже сами законы могут быть совершенно разными в разных вселенных. Число возможностей бесконечно.

Но в этом-то и дело. Если перебрать вселенные из этого огромного архипелага, окажется, что в большинстве из них нет благоприятных условий для жизни, по крайней мере в нашем ее понимании. Для вселенных с существенно иными характеристиками это ясно: если бы наша Вселенная действительно выглядела, как вселенная Садового шланга, жизнь на ней, в нашем понимании, была бы невозможной. Однако даже очень слабые различия с нашим физическим миром повлияли бы на процесс образования звезд и, например, на их способность служить космическими фабриками по производству сложных жизненно-важных атомов (таких, как углерод или кислород), которые разлетаются по всей Вселенной в результате взрывов сверхновых. Если, учитывая высокую чувствительность жизни к деталям физической конструкции, задаться теперь вопросом о том, почему взаимодействия и частицы в природе именно такие, какими мы их наблюдаем, то напрашивается следующий возможный ответ. На просторах мульти-вселенной они могут сильно отличаться, так что физические свойства в других вселенных могут быть и являются другими. Уникальность наблюдаемых нами свойств как раз в том, что в этих условиях возможно возникновение жизни. А жизнь, точнее жизнь разумных существ, есть необходимая предпосылка самого вопроса о том, почему свойства нашей Вселенной именно такие. Или, выражаясь яснее, они такие, потому что если бы они были другими, некому было бы задавать этот вопрос. Подобно тому, как удивление игрока, выигравшего в смертельную русскую рулетку с ничтожным шансом выжить, ослабевает с осознанием того, что в случае проигрыша некому было бы удивляться, принятие гипотезы мульти-вселенной снижает потребность получить объяснение, почему наша Вселенная выглядит так, а не иначе.

Эта аргументация является одним из вариантов идеи, давно известной под названием антропного принципа. Так, как она излагается, эта позиция диаметрально расходится с грезами о единой и жесткой теории с абсолютной предсказательной силой, в которой все выглядят так потому, что по-другому во Вселенной быть не может. Вместо того, чтобы быть воплощением поэтической красоты, где все идеально связано друг с другом с неизменным изяществом, мульти-вселенная и антропный принцип приводят к чудовищному переизбытку вселенных с неутолимой жаждой к изменениям. Установить справедливость гипотезы о мульти-вселенной будет крайне сложно, если вообще возможно. Даже если другие вселенные и существуют, вполне возможно, что мы никогда не вступим с ними в контакт. Однако безграничное расширение просторов «снаружи» в концепции мульти-вселенной, созвучное с выводом Хаббла о том, что Млечный путь есть лишь одна из многих галактик, по крайней мере, предостерегает нас, не слишком ли многого мы ожидаем от окончательной теории?

Мы должны требовать, чтобы окончательная теория давала непротиворечивое квантово-механическое описание всех взаимодействий и всей материи. Мы должны требовать, чтобы окончательная теория приводила к неоспоримой космологической модели для нашей Вселенной. Однако если картина мульти-вселенной верна (а это еще большой вопрос), то требовать от окончательной теории еще и объяснения детальных свойств природы (например, масс и зарядов частиц) может означать требовать слишком многого.

Необходимо подчеркнуть, что даже если принять гипотезу о мульти-вселенной, вывод о том, что это снизит предсказательную силу теории далеко не бесспорен. Причина, если объяснять ее на пальцах, состоит в следующем. Если дать волю фантазии и взять на вооружение гипотезу мульти-вселенной, следует также напрячь воображение и рассмотреть способы, как можно обуздать столь явный произвол, присущий этой гипотезе. Размышляя в консервативном духе, мы можем предположить (считая верной картину мульти-вселенной), что было бы возможным расширить окончательную теорию до ее максимальных границ, и тогда «расширенная окончательная теория» сможет точно ответить на вопросы, как и почему значения фундаментальных параметров разбросаны именно так во всех составляющих

вселенных.

И одним из умеренных способов будет предположение о возможности обобщения окончательной теории на все вселенные, в котором «обобщенная окончательная теория» сможет точно ответить на вопросы о значениях фундаментальных параметров во всех составляющих вселенных.

Более радикальный способ следует из предположения Ли Смолина из университета штата Пенсильвания. Под впечатлением схожести условий в момент Большого взрыва и в центре черных дыр, которые характеризуются колоссальной плотностью сжатой материи, он предположил, что черная дыра есть семя новой вселенной, рождающейся в муках Большого взрыва, но навеки спрятанной от нас за горизонтом событий черной дыры. Тем самым, предложив другой механизм образования мульти-вселенной, Смолин внес и новый элемент – космический вариант генетической мутации, – устраняющий теоретические ограничения антропного принципа9). Допустим, рассуждает он, что свойства дочерней вселенной, распустившейся из почки черной дыры, близки, но не тождественны свойствам породившей ее вселенной. Так как черные дыры образуются из потухших звезд, а интенсивность образования звезд определяется точными значениями масс и зарядов, то плодовитость конкретной вселенной сильно зависит от этих параметров. Следовательно, небольшие изменения параметров в дочерних вселенных приведут к появлению отпрысков, еще более приспособленных к воспроизводству черных дыр, число дочерних вселенных в которых будет еще больше10'. За многие поколения вселенные будут настолько оптимизированы к воспроизводству черных дыр, что заполонят мульти-вселенную. Таким образом, Смолин предложил расходящийся с антропным принципом динамический механизм, в котором параметры следующих поколений вселенных будут все ближе к значениям, оптимальным для образования черных дыр.

Даже в контексте мульти-вселенной этот подход приводит к новому способу объяснения характеристик материи и взаимодействий. Если теория Смолина верна, и если наша Вселенная является типичным элементом зрелой мульти-вселенной (конечно, оба эти «если» можно оспорить с многих точек зрения), то наблюдаемые нами характеристики частиц и взаимодействий должны быть оптимизированы для воспроизводства черных дыр. Иными словами, любое отклонение от этих параметров должно уменьшить эффективность образования черных дыр. Физики начали исследовать это утверждение, но в настоящее время они не пришли к согласию по этому вопросу. Однако даже если предположение Смолина окажется неверным, оно показывает, что окончательная теория может принять еще один облик. С первого взгляда, этой теории может не хватать строгой определенности. Может оказаться, что она будет описывать огромное царство вселенных, большинство из которых не имеет отношения к нашей. Более того, можно предположить, что это обилие вселенных действительно реализуется физически и образует мульти-вселенную – нечто, на первый взгляд, навсегда ограничивающее нашу предсказательную силу. Однако данное обсуждение иллюстрирует, что окончательное объяснение все же возможно, если нам удастся не только найти окончательные законы, но и установить их влияние на космологическую эволюцию в непредсказуемо широких масштабах.

Изучение космологических следствий из теории струн/М-теории будет, несомненно, главной темой исследований в XXI в. Не обладая ускорителями, способными разгонять частицы до энергий порядка планковской, мы будем вынуждены постоянно опираться на данные экспериментов «космологического ускорителя» Большого взрыва – на то, что разбросано этим взрывом по всей Вселенной. И если мы будем настойчивы, и нам будет сопутствовать удача, в конце концов нам удастся ответить на вопросы о том, что происходило при рождении Вселенной, или о том, почему она преобразовалась к виду, который предстает перед нами на земле и на небе. Конечно, от области, где зарыты разгадки фундаментальных проблем, нас отделяет пропасть неизведанного. Однако развитие квантовой теории гравитации в рамках теории суперструн усиливает уверенность в том, что современный теоретический аппарат поможет преодолеть эту пропасть и, после многих лет

напряженной работы, найти ответы на глубочайшие из когда-либо ставившихся вопросов.

Часть V. ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ В XXI ВЕКЕ

Глава 15. Перспективы

Пройдут века, и теория суперструн (или результат ее развития в рамках М-теории) преобразится настолько по сравнению с современной формулировкой, что станет неузнаваемой даже для ведущих современных исследователей. Возможно, в ходе поисков «теории всего» обнаружится, что теория струн – всего лишь один из множества необходимых шагов на пути к гораздо более величественной концепции космоса, которая оперирует понятиями, совершенно непохожими на те, с которыми мы до сих пор сталкивались. История науки учит тому, что каждый раз, когда все вокруг складывается в единую схему, природа обязательно приберегает для нас сюрпризы, которые требуют существенных, а иногда и радикальных изменений наших представлений об устройстве мира. Как и многие до нас, мы снова и снова самонадеянно убеждаем себя, что живем в тот самый период истории человечества, когда поиск фундаментальных законов Вселенной наконец-то близок к завершению. По словам Эдварда Виттена, «разгадка теории струн кажется нам столь близкой, что в моменты оптимистического подъема мне представляется, как в один прекрасный день окончательная форма теории может просто свалиться с небес кому-то на голову. Скорее всего, однако, путь к этой теории – гораздо более глубокой, чем любая из построенных до сих пор, – будет долгим, и когда-нибудь в XXI в., когда я буду уже слишком стар, чтобы придумать что-либо полезное по этому вопросу, молодые физики должны будут решать, нашли мы окончательную теорию или нет»1).

Хотя мы все еще ощущаем последствия второй революции в теории суперструн и продолжаем брать на вооружение порожденные ею открытия, по мнению большинства теоретиков, потребуется третий или даже четвертый переворот такой же силы, чтобы высвободить все могущество теории струн и оценить ее роль как окончательной теории. Как мы видели, теория струн уже рисует новую замечательную картину того, как работает Вселенная, однако остаются значительные препятствия и слабые места, которые, без сомнения, станут объектом основного внимания теоретиков XXI в. Таким образом, в этой последней части книги мы не сможем закончить историю поиска человечеством наиболее глубоких законов Вселенной. Поиск продолжается. Вместо этого устремим наш взгляд в будущее теории струн и обсудим пять основных вопросов, с которыми струнные теоретики обязательно будут иметь дело в процессе поиска окончательной теории.

Что является фундаментальным принципом теории струн?

Один из универсальных уроков последнего столетия состоит в том, что известные законы физики находятся в соответствии с принципами симметрии. Специальная теория относительности основана на симметрии, описываемой принципом относительности, на симметрии между всеми системами отсчета, движущимися относительно друг друга с постоянной скоростью. Гравитационное взаимодействие, в соответствии с его описанием в обшей теории относительности, основано на принципе эквивалентности, обобщающем принцип относительности на случай произвольным образом движущихся систем отсчета. Наконец, сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия основываются на более абстрактных принципах калибровочной симметрии.

Физики, как мы уже говорили, склонны придавать особое значение принципам симметрии, поднимая их на пьедестал объяснения мироустройства. С этой точки зрения гравитация существует для того, чтобы все возможные системы отсчета были равноправны – т. е. чтобы выполнялся принцип эквивалентности. Аналогично, негравитационные

взаимодействия существуют для того, чтобы в природе соблюдались соответствующие им калибровочные симметрии. Естественно, такой подход заменяет вопрос о существовании определенного типа взаимодействия вопросом о том, почему в природе действуют соответствующие принципы симметрии. Но это, определенно, и есть прогресс, особенно когда рассматриваемая симметрия оказывается исключительно естественной. Например, с какой стати система отсчета одного наблюдателя должна быть более предпочтительной, чем система другого? Напротив, с точки зрения фундаментальных законов вселенной кажется гораздо более естественным трактовать все системы отсчета одинаково; это и достигается принципом эквивалентности и введением понятия о гравитации в структуру космоса. Аналогичное рациональное зерно есть и в калибровочных принципах, лежащих в основе трех негравитационных взаимодействий (хотя, как обсуждалось в главе 5, для полного понимания этого факта требуется владение определенным математическим аппаратом).

В теории струн мы достигаем следующего уровня глубины при объяснении явлений, поскольку все описанные принципы симметрии, а также суперсимметрия возникают из структуры этой теории. В самом деле, если бы ход истории был иным и физики открыли бы теорию струн несколькими столетиями раньше, можно предположить, что все эти принципы симметрии были бы открыты при изучении теории струн. Однако не стоит забывать, что в то время как принцип эквивалентности дает нам понимание того, почему существует гравитация, а калибровочные симметрии дают понимание того, почему существуют негравитационные силы, в контексте теории струн эти симметрии есть лишь следствия. И хотя их значимость никоим образом не преуменьшается, они – всего лишь часть выводов, содержащихся в гораздо большей теоретической структуре.

Данное обсуждение со всей ясностью приводит к следующему вопросу: является ли сама теория струн необходимым следствием некоторого более широкого принципа, – возможно, но необязательно, принципа симметрии, – в том же самом смысле, в котором принцип эквивалентности с неизбежностью приводит к общей теории относительности, а калибровочные симметрии приводят к негравитационным взаимодействиям? К моменту написания данной книги ответ на этот вопрос никому не известен. Чтобы осознать его важность, достаточно представить Эйнштейна, пытающегося сформулировать общую теорию относительности без тех счастливых идей, которые посетили его в Бернском патентном бюро в 1907 г. и привели к принципу эквивалентности. Нельзя утверждать, что формулировка общей теории относительности была бы невозможна, однако определенно она стала бы чрезвычайно затруднительной. Принцип эквивалентности предоставляет сжатый, систематичный и мощный организующий подход для анализа гравитационного взаимодействия. К примеру, описание общей теории относительности, которое мы дали в главе 3, существенным образом опирается на принцип эквивалентности, а роль последнего в полном математическом формализме теории еще более критична.

В настоящее время теоретики находятся в положении Эйнштейна, утратившего принцип эквивалентности. С момента проницательного предположения Венециано в 1968 г. теория собиралась по кускам, открытие за открытием, революция за революцией. Однако центральный организующий принцип, который охватывает эти открытия, а также другие свойства теории в рамках одного универсального и систематического подхода, который делает существование каждого ингредиента абсолютно неизбежным, все еще не найден. Открытие этого принципа было бы центральным событием в развитии теории струн, так как это, вероятно, раскрыло бы внутренние механизмы теории с недостижимой ранее ясностью. Конечно, нет гарантии, что такой фундаментальный принцип существует, однако эволюция физики в течение последнего столетия дает теоретикам основания надеяться, что он все-таки есть. Так как мы рассматриваем следующую стадию развития теории струн, нахождение ее «принципа безальтернативности» – той базовой идеи, из которой вся теория появится с необходимостью, – имеет высший приоритет2).

Что есть пространство и время на самом деле, и можем ли мы без

них обойтись?

В предыдущих главах мы часто вольно использовали понятия пространства и пространства-времени. В главе 2 мы описали эйнштейновское понимание того, что пространство и время нерасторжимо перемешаны благодаря неожиданному факту, что движение объекта в пространстве влияет на его перемещение во времени. В главе 3 мы углубили наше понимание роли пространства-времени в описании космоса посредством общей теории относительности, которая показывает, что гравитационное взаимодействие между разными областями вызвано изменениями детальной структуры пространства-времени. Как обсуждалось в главах 4 и 5, необходимость учета сильных квантовых флуктуации в микромире привела к необходимости построения новой теории – так была открыта теория струн. И, наконец, в последующих главах мы видели, что согласно теории струн Вселенная имеет больше измерений, чем мы наблюдаем в повседневной жизни: некоторые измерения свернуты в крошечные, но сложные многообразия, способные претерпевать чудесные превращения, в которых их ткань прокалывается, рвется и затем восстанавливает сама себя.

Мы попытались проиллюстрировать эти идеи на рис. 3.4, 3.6 и 8.10, представляя структуру пространства и пространства-времени в качестве куска материала, из которого сшита Вселенная. Эти рисунки обладают хорошей наглядностью и регулярно используются самими физиками в качестве наглядных пособий в практической работе. Хотя иллюстрации такого рода и дают постепенное ощущение понимания, все же напрашивается вопрос: «Что мы реально имеем в виду, говоря о структуре Вселенной?».

Это глубокий вопрос, который в той или иной форме был предметом дебатов в течение сотен лет. Ньютон объявлял пространство и время вечными и неизменными ингредиентами в строении космоса, исходными структурами, лежащими за пределами вопросов и объяснений. В Началах Ньютон писал: «I. Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью. II. Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным»3).

Готфрид Лейбниц и другие шумно спорили, провозглашая, что пространство и время – всего лишь регистрационные приборы для удобной записи соотношений между объектами и событиями во Вселенной. Положение объекта в пространстве и во времени имеет смысл только в сравнении с другим объектом. Пространство и время есть лишь словарь для разговора об этих соотношениях, ничего более. Несмотря на то, что точка зрения Ньютона, поддержанная его тремя экспериментально проверенными законами движения, господствовала в течение более двух сотен лет, концепция Лейбница, развитая австрийским физиком Эрнстом Махом, гораздо ближе к современной картине. Как мы видели, специальная и общая теория относительности Эйнштейна решительно устранили понятие абсолютного и универсального пространства и времени. Однако можно спросить, является ли геометрическая модель пространства-времени, играющая центральную роль в общей теории относительности и теории струн, всего лишь удобной формулировкой для описания пространственных и временных отношений между различными событиями, или необходимо считать, что мы на самом деле погружены во что-то, когда говорим о нашем нахождении внутри ткани пространства-времени?

Хотя мы вступаем на территорию догадок, теория струн действительно предлагает ответ на этот вопрос. Гравитон, мельчайший сгусток гравитационных сил, является одним из частных примеров колебаний струны. И так же, как порождающее видимый свет электромагнитное поле состоит из огромного количества фотонов, гравитационное поле состоит из огромного числа гравитонов, т. е. из огромного числа мод колебаний струн, соответствующих этим частицам. В свою очередь, гравитационные поля кодируются искривлениями ткани пространства-времени, и поэтому мы должны отождествить структуру

пространства-времени с колоссальным числом струн, методично колеблющихся в этой моде. На языке теории поля такой огромный организованный массив вибрирующих аналогичным образом струн известен как когерентное состояние струн. Это довольно поэтичный образ – струны как нити ткани пространства-времени,– но нужно заметить, что его строгая формулировка все еще не разработана до конца.

Тем не менее описание ткани пространства-времени в такой сшитой из струн форме на самом деле приводит к следующему вопросу. Обычный кусок ткани есть конечный продукт работы ткача, который аккуратно соединил вместе отдельные нити, являющиеся исходным материалом текстильных изделий. Поэтому можно спросить, не существует ли исходного материала для ткани пространства-времени, т. е. такой конфигурации струн космической структуры, в которой они еще не срослись в организованную форму, узнаваемую нами в образе пространства-времени. Заметим, что не вполне корректно представлять это состояние как беспорядочную массу отдельных колеблющихся струн, которые затем должны сшиться вместе в упорядоченное целое, поскольку наше обычное восприятие заранее использует понятия пространства и времени – пространства колеблющихся струн и текущего времени, благодаря которым мы можем наблюдать изменение конфигурации от одного момента к последующему. В исходном состоянии, когда создающие структуру пространства-времени струны еще не включились в упорядоченный, когерентный танец колебаний, пространства и времени не существует. Сам наш язык слишком груб, чтобы говорить о таких вещах: в нем нет слов, с помощью которых можно описать то, что происходило до этого танца. Можно, в каком-то смысле, представлять себе исходные несвязанные струны «осколками» пространства-времени, которые породят знакомое пространство-время лишь после того, как включатся в резонансные колебания определенного вида.

Представление такого бесструктурного исходного состояния, в котором нет понятий пространства и времени в обычном смысле, требует предельного напряжения ума у большинства людей (во всяком случае, у меня). Как в шутке Стивена Райта о фотографе, одержимом идеей получить снимок горизонта с близкого расстояния, мы вынуждены бороться со столкновением парадигм, когда пытаемся представить себе Вселенную, которая есть, но в которой каким-то образом не используются понятия пространства и времени. Тем не менее, вероятно, что нам придется привыкнуть к таким понятиям и осознать их смысл еще до того, как мы сможем полностью оценить теорию струн. Причина состоит в том, что современная формулировка теории струн заранее предполагает существование пространства и времени, в котором струны (и другие объекты М-теории) движутся и вибрируют. Это позволяет вывести физические свойства теории струн во Вселенной с одним временным измерением, определенным числом развернутых пространственных измерений (обычно равным трем) и определенным числом дополнительных измерений, которые свернуты в одну из конфигураций, допускаемых уравнениями движения теории. Такой вывод, однако, подобен оценке творческих способностей художницы, которую для этого заставляют раскрашивать детские «раскраски». Без сомнения, она внесет персональное своеобразие в отдельные фрагменты, но при столь жестких ограничениях на стиль живописи для нас откроется лишь доля ее таланта. Аналогично, так как триумфом теории струн было естественное объединение квантовой механики и гравитации и так как гравитация связана с формой пространства и времени, мы не должны ограничивать теорию, заставляя ее действовать в уже существующих рамках пространства-времени. Вместо этого, так же, как мы должны позволить нашей художнице работать с чистого листа, мы должны позволить теории струн создавать ее собственную пространственно-временную арену, начиная с конфигурации, в которой пространство и время отсутствуют.

Есть надежда на то, что в теории, описывающей ход эволюции Вселенной с этой начальной точки (возможно, в эпоху до Большого взрыва, если, конечно, можно использовать временные термины – в отсутствие других лингвистических конструкций), возникнет фон когерентных колебаний струн, порождающий стандартные понятия пространства и времени. В таком подходе, если его удастся реализовать, пространство, время

и, соответственно, размерность не являлись бы определяющими элементами Вселенной. Они были бы лишь удобными понятиями, вытекающими из существования более фундаментального первичного состояния.

Последние исследования по М-теории, возглавляемые Стивеном Шенкером, Эдвардом Виттеном, Томом Бэнксом, Вилли Фишлером, Леонардом Сасскиндом и многими другими, уже сейчас показывают, что некоторое представление о мире без пространства и времени может дать нечто, известное под названием нуль-брана. Этот объект, возможно, является наиболее фундаментальным в М-теории; на больших расстояниях он ведет себя подобно точечной частице, однако на малых расстояниях его свойства совершенно иные. Исследования показали, что на масштабах, меньших планковских, нуль-браны, как и струны, демонстрируют нам неадекватность общепринятых понятий пространства и времени, однако при этом они позволяют взглянуть сквозь крошечное окошко на новый необычный мир, который там существует. Исследования с этими нуль-бранами показывают, что обычная геометрия заменяется новым аппаратом, известным под названием некоммутативная геометрия – областью математики, основы которой были разработаны французским математиком Аланом Конном4'.

В этом геометрическом подходе общепринятые понятия пространства и расстояния между точками уступают свое место совершенно иному набору понятий. Физики показали, однако, что если мы будем работать с расстояниями, большими планковской длины, стандартное представление о пространстве-времени действительно восстановится. Возможно, подходу некоммутативной геометрии все же недостает существенных моментов для описания самого изначального состояния, однако в нем уже содержится намек на то, что должно входить в более полный формализм для исследования пространства и времени.

Нахождение корректного математического аппарата для формулировки теории струн без обращения к изначальным понятиям пространства и времени является одной из наиболее важных задач, с которыми сталкиваются теоретики. Разобравшись в том, как возникает пространство и время, мы могли бы сделать огромный шаг к ответу на ключевой вопрос, какая геометрическая структура возникает на самом деле.

Приведет ли теория струн к переформулировке квантовой механики?

Вселенная подчиняется законам квантовой механика с фантастической точностью. Однако даже с учетом этого, при формулировке теорий за последние полвека физики следовали, конструктивно говоря, стратегии, в которой квантовой механике отводилось несколько второстепенная роль. При разработке теорий физики часто начинают исследование на чисто классическом языке, в котором игнорируются квантовые распределения вероятностей, волновые функции и т.д., на языке, который был бы понятен физикам времен Максвелла и даже времен Ньютона, и затем накладывают квантовые концепции на классические идеи. Это подход не является чем-то удивительным, так как он прямо отражает наше восприятие. На первый взгляд, природой правят законы, коренящиеся в классических представлениях, таких, как частица, имеющая определенное положение и определенную скорость в любой заданный момент времени. Только после детальных исследований микромира мы осознали, что должны модифицировать эти знакомые классические идеи. Процесс развития науки прошел эволюцию от классического подхода до подхода, модифицированного квантовыми результатами, что и по сей день находит свое отражение в том, как физики разрабатывают новые теории.

Это, естественно, касается и теории струн. Математический формализм, описывающий теорию струн, начинается с уравнений, описывающих движение крошечного, бесконечно тонкого куска классической нити, которые, в принципе, мог написать еще Ньютон триста лет назад. Затем эти уравнения квантуются. Иными словами, в систематическом подходе, развитом физиками в течение более 50 лет, классические уравнения преобразуются в

квантово-механические, куда естественным образом включены вероятности, неопределенность, квантовые флуктуации и т.д. Фактически, в главе 12 мы видели эту процедуру в действии: в петлевых процессах (см. рис. 12.6) используются квантовые понятия (в данном случае, мгновенное квантово-механическое рождение пар виртуальных струн), а число петель определяет точность, с которой учтены квантово-механические эффекты.

Стратегия, в которой сначала используется классическое теоретическое описание, а затем включаются квантово-механические эффекты, в течение многих лет являлась в высшей степени плодотворной. В частности, именно она лежит в основе стандартной модели физики частиц. Однако возможно и, судя по последним результатам, вероятно, что подобный метод слишком консервативен для обращения с теориями такого высокого полета, как теория струн и М-теория. Причина состоит в том, что коль скоро мы осознали, что Вселенной управляют квантово-механические принципы, наши теории должны являться квантово-механическими с самого начала. Ранее нам успешно удавалось менять классическую точку зрения на квантовую, поскольку мы зондировали Вселенную недостаточно глубоко, чтобы этот грубый подход нас подводил. Однако, учитывая глубину теории струн/М-теории, мы вполне можем подойти к последней черте этой проверенной на практике стратегии.

Особые основания для этого возникают при пересмотре некоторых результатов второй революции в теории суперструн (подытоженных на рис. 12.11). Как мы обсуждали в главе 12, дуальности, лежащие в основе пяти струнных теорий, говорят о том, что физические процессы, происходящие в одной формулировке теории струн, могут быть переформулированы на языке любой из остальных. На первый взгляд, это перефразированная формулировка имеет мало общего с исходным описанием, но в этом и состоит сила дуальности: дуальность позволяет описывать один и тот же физический процесс несколькими совершенно различными способами. Эти результаты нетривиальны и удивительны, однако мы еще не упомянули об их следствии, которое, возможно, важнее всего.

Процесс в одной из пяти теорий струн, который сильно зависит от квантовых эффектов (например, включающий струнные взаимодействия, которые не могли бы произойти в мире, управляемом классическими, а не квантовыми законами), преобразованиями дуальности может быть часто сведен к процессу, слабо зависящему от квантовых эффектов с точки зрения других теорий струн (например, к процессу, характеристики которого уточняются с учетом квантовых поправок, но качественная форма которого напоминает то, что могло происходить в чисто классическом мире). Это означает, что квантовая механика тесно переплетается с симметриями дуальности, лежащими в основе теории струн/М-теории: они являются неотъемлемыми квантово-механическими симметриями, так как одно из дуальных описаний сильно зависит от квантового рассмотрения. Из этого с необходимостью следует, что полная формулировка теории струн/М-теории, которая в основе своей включает обнаруженные симметрии дуальности, не может начинаться с классического рассмотрения, а затем подвергаться квантованию, как в обычном подходе. Если начинать с классической формулировки, то симметрии дуальности неизбежно будут упущены, так как они имеют место только в случае, если квантовые эффекты принимаются во внимание. Вместо этого оказывается, что полная формулировка теории струн/М-теории должна разрушить традиционный подход и дать жизнь полновесной квантово-механической теории.

В настоящее время никто не знает, как реализовать такой подход. Однако в качестве следующего крутого поворота в нашем понимании многие теоретики предвидят переформулировку того, как квантовые принципы встраиваются в наше теоретическое описание Вселенной. Например, как сказал Кумрун Вафа: «Я думаю, что переформулировка квантовой механики, которая разрешит многие из ее загадок, уже очень близка. Я думаю, многие разделяют точку зрения, что недавно обнаруженные дуальности указывают на новое, более геометрическое описание квантовой механики, в котором пространство, время и квантовые свойства будут неразрывно связаны друг с другом»5).

Или, согласно Эдварду Виттену, «я верю, что логический статус квантовой механики

скоро изменится, и это будет похоже на то, как изменился логический статус гравитации, когда Эйнштейн открыл принцип эквивалентности. В случае квантовой механики такой процесс далек от завершения, однако я думаю, что люди когда-нибудь будут рассматривать нашу эпоху как период начала этой науки»6'.

С разумным оптимизмом можно предположить, что переформулировка принципов квантовой механики в рамках теории струн может привести к более мощному формализму, который позволит понять, как рождалась Вселенная и почему есть такие сущности, как пространство и время – к формализму, который продвинет нас на шаг вперед к ответу на вопрос Лейбница: почему есть «что-то», а не «ничто».

Можно ли теорию струн проверить экспериментально?

Среди многих свойств теории струн, которые мы обсудили в предыдущих главах, возможно, особенно важны три нижеследующих. Во-первых, гравитация и квантовая механика являются неотъемлемыми принципами устройства Вселенной, и поэтому любой проект единой теории обязан включать и то, и другое. В теории струн это реализуется. Во-вторых, исследования на протяжении последнего столетия показали, что существуют и другие ключевые идеи, – многие из которых были проверены экспериментально, – являющиеся центральными для нашего понимания Вселенной. Среди этих идей мы упомянем спин, существование поколений частиц материи и частиц-переносчиков взаимодействия, калибровочную симметрию, принцип эквивалентности, нарушение симметрии и суперсимметрию. Все эти идеи естественным образом вытекают из теории струн. В-третьих, в отличие от более общепринятых теорий, таких, как стандартная модель с ее 19 свободными параметрами, которые могут подгоняться для обеспечения согласия с экспериментом, в теории струн свободных параметров нет. В принципе, ее выводы должны быть совершенно определенными – они должны обеспечить однозначную проверку того, верна теория или нет.

На пути от этого общего теоретизирования к практическому воплощению есть много препятствий. В главе 9 мы описали некоторые технические преграды, которые и сегодня стоят перед нами, например, определение вида добавочных измерений. В главах 12 и 13 мы рассмотрели эти и другие препятствия в более широком контексте необходимости точного понимания теории струн, которое, как мы видели, естественным образом приводит нас к М-теории. Без сомнения, для достижения полного понимания теории струн/М-теории потребуется очень много работы и столь же много изобретательности.

На каждом этапе исследований в теории струн физики искали и будут продолжать искать экспериментально наблюдаемые следствия теории. Мы не должны терять из виду и более отдаленные возможности для поиска подтверждений теории струн, обсужденные в главе 9. В будущем, по мере углубления нашего понимания, без сомнения будут открыты другие эффекты или свойства теории струн, и они подскажут нам новые пути для косвенного экспериментального подтверждения. Важно отметить, что главной вехой для теории струн могло бы стать подтверждение суперсимметрии после открытия частиц-суперпартнеров, рассмотренных в главе 9. Напомним, что суперсимметрия была открыта в процессе теоретического исследования теории струн, и что это – центральная часть теории. Ее экспериментальное обнаружение могло бы стать убедительным, хотя и косвенным, подтверждением теории струн. Более того, открытие частиц-суперпартнеров могло бы стимулировать новые исследования: важность подтверждения суперсимметрии не исчерпывается лишь выяснением ответа на вопрос о том, имеет ли она отношение к нашему миру. Значения масс и зарядов частиц-суперпартнеров покажут, каким конкретным образом суперсимметрия реализуется в законах природы. И у теоретиков, занимающихся струнами, будет шанс проверить, допускает ли эта реализация законченную формулировку и объяснение в рамках теории струн. Конечно, с еще большим оптимизмом можно надеяться, что в течение следующих десяти лет, перед тем, как заработает Большой адронный

ускоритель в Женеве, прогресс в понимании теории струн будет достаточным для того, чтобы сделать детальные предсказания о суперпартнерах до их ожидаемого открытия. Подтверждение таких предсказаний стало бы моментом фундаментальной важности в истории науки.

Существуют ли пределы познания?

Объяснение всего – даже в ограниченном смысле понимания всех сторон взаимодействий и элементарных составляющих Вселенной – есть одна из величайших задач, с которыми когда-либо сталкивалась наука. И теория струн впервые дает нам достаточно глубокий подход для решения этой задачи. Но сможем ли мы когда-нибудь понять все, на что способна теория, и, например, вычислить массы кварков или константу связи электромагнитного взаимодействия, от точных значений которых так много зависит во Вселенной? Как говорилось выше, на пути к цели стоят многочисленные теоретические преграды; сегодня важнее всего построить законченную формулировку теории струн/М-теории, не опирающуюся на теорию возмущений.

Но может ли случиться так, что даже при полном понимании теории струн/М-теории в рамках новой и более прозрачной формулировки квантовой механики мы окажемся неспособными ответить на вопрос о вычислении масс частиц и констант взаимодействия? Возможно ли, что вместо теоретических вычислений нам опять придется прибегнуть к экспериментальным измерениям для определения этих значений? И, более того, может ли так статься, что причиной этому будет не то, что требуется еще более глубокая теория, а то, что объяснений этим наблюдаемым свойствам реального мира не существует?

На все эти вопросы можно сразу ответить «да». Как в свое время сказал Эйнштейн: «Наиболее необъяснимое во Вселенной – это то, что она объяснима»7).

Удивление нашей способностью понимания Вселенной в целом легко улетучивается в век быстрого и впечатляющего прогресса.

Возможно, однако, что существует предел познания. И существование этого предела мы будем вынуждены признать после того, как достигнем самого глубокого уровня понимания, который может предложить наука, а некоторые черты Вселенной все же останутся необъясненными. Может быть, нам придется принять, что определенные черты Вселенной таковы, каковы они есть, лишь вследствие стечения обстоятельств, случая или божественного предопределения. Успех научного подхода в прошлом дал нам смелость думать, что, обладая достаточным количеством времени и прилагая достаточные усилия, мы сможем раскрыть загадки природы. Однако столкновение с абсолютным пределом научных объяснений, а не с техническим препятствием или с текущими границами человеческого понимания, которые постепенно расширяются, будет шоком, к которому опыт прошлого не может нас подготовить.

Несмотря на то, что эта проблема непосредственно относится к поискам окончательной теории, разрешить ее мы все еще не в силах; на самом деле, проблема предела научного познания (в приведенном выше широком смысле), возможно, не будет разрешена никогда. Мы видели, например, что даже для гипотезы мульти-вселенной, ограничивающей, на первый взгляд, возможность научного познания, существуют столь же гипотетические теории, в которых возможность познания восстанавливается (по крайней мере, в принципе).

Один из основных вопросов, возникающих при таком анализе – вопрос о роли космологии в установлении проявлений единой теории. Как мы обсуждали, суперструнная космология – это молодая наука, даже по стандартам молодой теории струн. Она, без сомнения, будет объектом пристального внимания исследователей в течение ближайших лет и, вероятно, станет одной из наиболее быстро развивающихся областей теории. По мере того, как мы продолжаем получать новые сведения о свойствах теории струн/М-теории, наша способность оценивать космологические проявления этой впечатляющей попытки построения единой теории станет даже сильнее. Возможно, конечно, что такие исследования

однажды убедят нас в том, что предел научному познанию действительно существует. Но возможно и обратное: что они возвестят о новой эре, в которой фундаментальное объяснение Вселенной будет, наконец, найдено.

Достичь звезд

Хотя технологические ограничения привязывают нас к Земле и ее ближайшим спутникам в Солнечной системе, способность мыслить и экспериментировать позволила нам прощупать дальние зоны внутреннего и внешнего космического пространства. За последние сто лет коллективными усилиями многих физиков были раскрыты некоторые из самых глубочайших тайн природы. И эти добытые драгоценные крупицы познания расширили границы мира, который мы считали известным, но великолепие которого мы не могли себе и близко вообразить. Один из критериев глубины физической теории – это степень, в которой она изменяет наше мировоззрение в отношении тех понятий, которые до этого считались незыблемыми. В соответствии с этим критерием, квантовая механика и теория относительности находятся за гранью самых безумных ожиданий. Волновые функции, вероятности, квантовое туннелирование, беспорядочные флуктуации вакуумной энергии, перемешивание пространства и времени, относительность одновременности, искривление пространства, черные дыры, Большой взрыв. Кто мог предположить, что интуитивный, механистический, раз и навсегда заведенный мир Ньютона окажется жалким частным случаем, и что существует целый мир, лежащий прямо за порогом мира обычных вещей?

Но даже эти потрясающие основы открытия – лишь элементы всеобъемлющей схемы. С твердой верой, что законы большого и малого должны сливаться вместе в согласованное целое, физики упорно охотятся за ускользающей единой теорией. Поиск не завершен, но благодаря теории суперструн, обобщенной до М-теории, возникла, в конце концов, убедительная схема для объединения квантовой теории, обшей теории относительности, а также теорий сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Изменения наших взглядов на мир, порожденные этими достижениями, фундаментальны: мы представляем себе струнные петли и вибрирующие капли, которые увлекают все элементы мироздания в танец колеблющихся мод, педантично исполняемый во Вселенной с многочисленными скрытыми измерениями, способными претерпевать экстремальные изгибы, при которых структура пространства-времени рвется и затем снова себя восстанавливает. Кто мог подумать, что слияние гравитации и квантовой механики в единую теорию материи и взаимодействий приведет к такой революции в нашем понимании устройства Вселенной?

Без сомнения, поиск законченного и удобного вычислительного формализма теории суперструн сулит еще более грандиозные сюрпризы. Уже сейчас в исследованиях по М-теории мы увидели скрывающуюся за планковской длиной новую область Вселенной, в которой, возможно, нет понятия пространства и времени. И вот противоположная крайность: мы видели, что наша Вселенная может оказаться всего лишь одним из неисчислимых пузырей пены на поверхности широкого и турбулентного космического океана мульти-вселенной. Эти рассуждения сейчас кажутся невероятными, но они могут предвещать следующий скачок в нашем понимании Вселенной.

И в то время как наши взоры обращены в будущее в предвкушении грядущих чудес, мы можем оглянуться назад и изумиться проделанному пути. Поиск фундаментальных законов Вселенной – это определенно человеческая драма, которая укрепила разум и обогатила дух людей. Вот яркое описание Эйнштейна его собственного поиска смысла гравитации: «Годы беспокойного поиска во тьме с огромной жаждой результата, чередованием уверенности и опустошения, и, наконец, прорывом к свету»8'. Без сомнения, эта фраза – свидетельство человеческой борьбы. Мы все, каждый по-своему, искатели истины, и мы все жаждем ответа на вопрос, зачем мы в этом мире. Взбираясь вместе на гору познания, физики следующих поколений крепко стоят на плечах предыдущих, смело устремляясь к вершине. Удастся ли кому-нибудь из наших потомков получить полную картину и увидеть обширную и

элегантную Вселенную во всей ее ослепительной красе? Мы не можем этого предсказать. По мере того как каждое новое поколение взбирается немного выше, мы понимаем изречение Якоба Броновски: «В каждом веке есть поворотный момент, новый способ видения и признания согласованности мира»9). И так как наше поколение уже восхищается новым видением Вселенной – нашим новым способом признания согласованности мира, мы выполнили часть задачи, построив свою ступеньку на лестнице, ведущей человека к звездам.

Примечания

Глава 1

1. Таблица справа – расширенный вариант табл. 1.1. В нее входят массы и константы взаимодействия элементарных частиц всех трех семейств. Кварк каждого типа может обладать тремя значениями сильного заряда, которые названы (довольно причудливо) цветами. Приведенные значения константы слабого взаимодействия представляют собой, строго говоря, «третью компоненту» слабого изоспина. (Мы не привели «правосторонние» компоненты частиц – они отличаются отсутствием заряда слабого взаимодействия.)

2. Помимо показанных на рис. 1.1 петель (замкнутых струн), могут также существовать струны со свободными концами (так называемые открытые струны). Чтобы упростить изложение, в большей части книги мы ограничимся замкнутыми струнами, хотя практически все, о чем мы будем говорить, справедливо для струн обоих типов.

3. Из письма Альберта Эйнштейна к другу. Написано в 1942 г., цитируется по книге: Tony Hey, Patrick Wallers, Einstein's Mirror. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997.

4. Steven Weinberg, Dreams of a Final Theory. New York: Pantheon, 1992, p. 52. (Рус. пер.: Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М: УРСС, 2004.)

5. Интервью с Эдвардом Виттеном, 11 мая 1998 г.

Глава 2

1. Присутствие массивных тел, подобных нашей Земле, усложняет картину за счет добавления гравитационных сил. Поскольку мы сфокусируем свое внимание на движении в горизонтальном, а не в вертикальном направлении, можно игнорировать присутствие Земли. В следующей главе мы подробно рассмотрим гравитацию.

2. Если выражаться более точно, 300 000 км/с – это скорость света в вакууме. Когда свет распространяется в какой-либо среде, например в воздухе или стекле, его скорость уменьшается, подобно тому, как камень, брошенный со скалы, замедляет свое движение, войдя в воду. Поскольку замедление скорости света в среде по отношению к его скорости в вакууме не оказывает никакого влияния на рассматриваемые нами релятивистские эффекты, мы будем его в дальнейшем игнорировать.

3. Для читателей, любящих математику, заметим, что эти наблюдения могут быть выражены в количественной форме. Например, если движущиеся световые часы имеют скорость и, а фотон совершает свое движение «туда и обратно» за t секунд

(по показаниям неподвижных часов), то за время, которое потребуется фотону, чтобы вернуться к нижнему зеркалу, световые часы пройдут расстояние vt. Используя теорему Пифагора, можно рассчитать длину пути по диагонали на рис. 2.3.

$$\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$$

Она составит, где Л представляет

$$t = 2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}/c$$

$$2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}/c$$

$$2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$$

собой расстояние между зеркалами световых часов (равное 15 см). Суммарная длина двух диагональных отрезков будет равна Поскольку скорость света является константой,

которая обычно обозначается с, фотону потребуется секунд на то, чтобы пройти оба диагональных отрезка. Таким образом, у нас есть уравнение, из которо-

$$t = 2h/\sqrt{c^2 - v^2}$$

го мы можем найти значение Чтобы избежать недоразумений, обозначим это

$$t_{движ} = 2h/\sqrt{c^2 - v^2}$$

значение как, индекс у t

$$t_{неподв} = 2h/c$$

в этом выражении указывает на то, что мы измеряем продолжительность одного цикла для движущихся часов. С другой стороны, время цикла для неподвижных часов tнеподв можно рассчитать по формуле. Используя неслож-

$$t_{движ} = t_{неподв}/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

ные алгебраические преобразования, получим выражение, которое непосредственно свидетельствует о том, что продолжительность тика движущихся часов больше, чем у неподвижных. Это означает, что для промежутка времени между двумя выбранными событиями движущиеся часы совершат меньшее число тиков, чем неподвижные, т. е. для движущегося наблюдателя пройдет меньше времени.

4. Если опыт с ускорителем частиц, понятный узкому кругу специалистов, не выглядит для вас очень убедительным, приведем еще один пример. В октябре 1971 г. Дж. С. Хафеле, работавший в то время в университете Вашингтона в Сент-Луисе и Ричард Китинг из Военно-морской лаборатории США провели эксперимент, в ходе которого цезиевые атомные часы провели около 40 часов на борту самолетов, совершавших коммерческие авиарейсы. После того, как был учтен ряд тонких эффектов, связанных с действием гравитации (которая будет обсуждаться в следующей главе), расчеты с использованием специальной теории относительности показали, что показания движущихся часов должны быть меньше показаний неподвижных часов на несколько сотен миллиардных долей секунды. Именно такие данные и получили Хафеле и Китинг: для движущихся часов время действительно замедляет ход.

5. Хотя на рис. 2.4 правильно изображено сжатие тела в направлении движения, этот рисунок не дает представления о том, что мы в действительности

Частица Масса* Электрический заряд" Заряд слабого взаимодействия Заряд сильного взаимодействия

Семейство 1

Электрон 0,00054 -1 -1/2 0

Электронное нейтрино «!0"8 0 1/2 0

и-кварк 0,0047 2/3 1/2 красный, зеленый, синий

d-кварк 0,0074 -1/3 -1/2 красный, зеленый, синий

Семейство 2

Мюон 0,11 -1 -1/2 0

Мюонное нейтрино «0,0003 0 1/2 0

с-кварк 1,6 2/3 1/2 красный, зеленый, синий

s-кварк 0,16 -1/3 -1/2 красный, зеленый, синий

Семейство 3

Тау-частица 1,9 -1 -1/2 0

Тау-нейтрино «0,033 0 1/2 0

t-кварк 189,0 2/3 1/2 красный, зеленый, синий

b-кварк 5,2 -1/3 -1/2 красный, зеленый, синий

* В единицах массы протона. ** В единицах заряда протона.

увидим, если мимо нас пролетит тело, движущееся со световой скоростью (при условии, что наш глаз или фотографическое оборудование, которое мы используем, имеют достаточную разрешающую способность, чтобы вообще хоть что-то увидеть!). Чтобы увидеть что-то, глаз или камера должны получать свет, отраженный от поверхности тела. Однако, поскольку отраженный свет приходит от разных участков тела, тот свет, который

мы будем видеть в каждый момент времени, будет проходить по путям различной длины. Результатом явится релятивистская иллюзия – тело будет выглядеть сократившимся по длине и повернутым.

$$x = (ct, x_1, x_2, x_3) = (ct, \vec{x})$$

6. Для читателей, имеющих математическую подготовку, заметим, что по 4-вектору положения в пространстве-времени можно построить 4-вектор скорости

$$u = \frac{dx}{d\tau}$$

где т – собственное время, определяемое соотношением

$$d\tau^2 = dt^2 - c^{-2}\left(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2\right)$$

Тогда «скорость в пространстве-времени» будет представлять собой величину 4-вектора и,

$$\sqrt{\frac{(c^2\,dt^2 - d\vec{x}^2)}{(dt^2 - c^{-2}\,d\vec{x}^2)}}$$

которая равна скорости света с. Теперь уравнение

$$c^2\left(\frac{dt}{d\tau}\right)^2 - \left(\frac{d\vec{x}}{d\tau}\right)^2 = c^2$$

можно переписать в форме

$$c^2\left(\frac{d\tau}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\vec{x}}{dt}\right)^2 = c^2$$

$$\sqrt{(d\vec{x}/dt)^2}$$

Это показывает, что увеличение скорости тела в пространстве должно сопровождать-

$$d\tau/dt$$

ся уменьшением величины, которая пред-

$$d\tau$$

ставляет собой скорость объекта во времени (скорость, с которой идут его собственные часы по отношению к скорости наших неподвижных часов dt).

Глава 3

1. Isaac Newton, Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World, Irans. A. Motleand Florian Cajori. Berkeley: University of California Press, 1962, v. I, p. 634. (В рус. пер. см.: письмо Ньютона архиепископу Бентли от 25 февраля 1693 г. // Письма Ньютона и Ньютону. М…-ВИЕТ, 1993, №1, с. 33-45.)

2. Если говорить точнее, Эйнштейн осознал, что принцип эквивалентности сохраняется до тех пор, пока наблюдения ограничены достаточно малой областью пространства, т. е. до тех пор, пока ваше «купе» достаточно мало. Причина этого состоит в следующем. Интенсивность (и направление) гравитационных полей могут изменяться от точки к точке. Однако мы считаем, что купе в целом ускоряется как единое тело и, следовательно, это ускорение имитирует действие однородного гравитационного поля. Чем меньше будет купе, тем меньше пространство, в котором гравитационное поле может изменяться и, следовательно, тем более применимым станет принцип эквивалентности. Разность между однородным гравитационным полем, имитируемым ускорением, и возможно неоднородным «реальным» гравитационным полем, созданным совокупностью массивных тел, носит название «приливного» гравитационного поля (поскольку им объясняется влияние тяготения Луны на приливы на Земле). Подытоживая данное примечание, можно сказать, что уменьшая размер купе, можно сделать приливные гравитационные поля менее заметными и добиться того, что ускоренное движение и «реальное» гравитационное поле будут неразличимы.

3. Цитируется по книге: Albrecht Folsing, Albert Einstein. New York: Viking, 1997, p. 315.

4. John Stachel, Einstein and the Rigidly Rotating Disk. Опубликовано в General Relativity and Gravitation, ed. A. Held. New York: Plenum, 1980, p. I.

5. Анализ аттракциона Верхом на торнадо или «жесткого вращающегося диска», как он называется на более профессиональном языке, может легко привести к недоразумениям. Так, например, и по сей день нет общего согласия по ряду деталей этого примера. В тексте мы

следовали духу анализа, выполненного самим Эйнштейном; в примечании мы, оставаясь на той же точке зрения, постараемся пояснить некоторые особенности, которые могут привести к недоразумениям. Во-первых, может показаться непонятным, почему длина окружности колеса не испытает лоренцевского сокращения в той же мере, что и линейка: в этом случае результат, полученный Слимом, совпадал бы с первоначальным. Здесь следует иметь в виду, что мы все время считали, что колесо непрерывно вращается и никогда не рассматривали его в состоянии покоя. Таким образом, с точки зрения неподвижных наблюдателей, единственное различие между измерениями длины окружности и измерениями Слима будет состоять в том, что линейка Слима испытала лоренцевское сокращение; колесо вращалось и во время наших измерений, и тогда, когда мы

наблюдали за измерениями Слима. Видя, что линейка Слима испытала сокращение, мы понимали, что ему придется приложить ее большее число раз, чтобы пройти по всей длине окружности и, следовательно, он получит большее значение, чем мы. Лоренцевское сокращение окружности колеса можно установить, только сравнив результаты измерений на покоящемся и вращающемся колесе, однако такое сравнение нас не интересовало. Во-вторых, хотя нам и не требовалось анализировать аттракцион в состоянии покоя, у вас может остаться вопрос, а что случится с колесом, когда оно замедлит свое движение и остановится? Может показаться, что в этом случае следует учитывать изменение длины окружности при изменении скорости вращения, вызванное сокращением Лоренца. Но как можно согласовать это с неизменным радиусом? Это тонкая проблема, решение которой опирается на тот факт, что в реальном мире не существует абсолютно жестких тел. Тела могут растягиваться и изгибаться в ответ на испытываемое ими растяжение или сжатие. Если этого не произойдет, то, как указал Эйнштейн, диск, изготовленный путем охлаждения вращающейся отливки, может разрушиться при изменении скорости вращения. Более подробно история с жестким вращающимся диском описана в работе Стахеля4).

6. Искушенный читатель поймет, что в примере с аттракционом Верхом на торнадо, т. е. в случае равномерно вращающейся системы отсчета, искривленные трехмерные пространственные сечения, на которых мы сконцентрировали наше внимание, объединятся в четырехмерное пространство-время с нулевой кривизной.

7. Цитата Германа Минковского взята из работы: Albrecht Folsing, Albert Einstein. New York: Viking, 1997, p. 189.

8. Интервью с Джоном Уилером, 27 января 1998 г.

9. Точность существующих атомных часов достаточна для того, чтобы обнаружить столь малые и даже еще меньшие искривления времени. Например, в 1976 г. Робер Вессо и Мартин Левин из Смитсонианской астрофизической обсерватории Гарвардского университета совместно со своими коллегами из Национального управления по аэронавтике и космическим исследованиям США (NASA) установили на ракете Scout D, стартовавшей с о, Уоллопс в штате Вирджиния, атомные часы, точность которых составляет одну триллионную долю секунды в час. Они надеялись продемонстрировать, что когда ракета достигнет достаточной высоты (в результате чего уменьшится влияние гравитационного притяжения Земли), идентичные часы, расположенные на Земле (которые будут в полной мере подвергаться действию земного тяготения) будут идти медленнее. Благодаря двустороннему обмену микроволновыми сигналами исследователи смогли сравнить показания двух атомных часов и установить, что действительно, на достигнутой ракетой максимальной высоте 10000 км установленные на ней атомные часы обогнали на 4 миллиардных доли секунды часы, оставшиеся на Земле. Расхождение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов составило менее 0,01 %.

10. В середине XIX в. французский ученый Урбен Жан-Жозеф Леверье установил, что орбита планеты Меркурий немного отклоняется от орбиты, по которой она должна прашаться вокруг Солнца в соответствии с ньютоновским законом всемирного тяготения. В течение более чем полувека предлагались самые разные объяснения так называемой аномальной прецессии перигелия (на обычном языке, в крайних точках своей орбиты

Меркурий оказывался не в том месте, в котором он должен был находиться согласно теории Ньютона). В качестве возможных причин рассматривалось гравитационное влияние неизвестной планеты или пояса астероидов, влияние неизвестного спутника, воздействие межзвездной пыли, сплюснутость Солнца, однако ни одно из этих объяснений не получило общего признания. В 1915 г. Эйнштейн рассчитал прецессию перигелия Меркурия с помощью уравнений только что открытой им общей теории относительности. Он получил результат, который по его собственному свидетельству заставил его сердце учащенно биться: значение, полученное с помощью обшей теории относительности, в точности совпадало с экспериментальными данными. Этот успех, несомненно, был одной из важных причин, заставивших Эйнштейна поверить в свою теорию, но большинство других исследователей ожидало предсказания новых явлений, а не объяснения уже известных аномалий. Более подробно эта история описана в книге: Abraham Pais. Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein. New York: Oxford University Press, 1982. (Рус. пер.: Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна, М.: Наука, Физматлит, 1989.)

11. Robert P. Crease and Charles C.Mann, The Second Creation. New Brunswick. N. J.: Rutgers University Press, 1996, p. 39.

12. К большому удивлению ученых, недавние тщательные исследования скорости расширения Вселенной показали, что в нее может давать вклад очень небольшая, но ненулевая космологическая постоянная.

Глава 4

1. Richard Feynman, The Character of Physical Lain. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1965, p. 129, (Рус. пер.: Феинман Р. Характер физических законов. М.: Мир, 1968.)

2. Хотя работа Планка разрешила загадку бесконечной энергии, по всей видимости, не эта загадка была непосредственной причиной, побудившей его к этому исследованию. Планк пытался решить другую, очень близкую проблему, связанную с экспериментальными данными, описывающими распределение энергии в духовке (или. если быть более точным, в «черном теле») по длинам волн. Дополнительные сведения по истории этих работ интересующийся читатель может найти в книге Thomas S. Kuhn, Black-Body Theory and the Quan-

tum Discontinuity, 1894-1912. Oxford. Eng.: Clarendon, 1978.

3. Более точно, Планк показал, что волны, минимальная энергия которых превышает их ожидаемый средний энергетический вклад (согласно термодинамике девятнадцатого века), подавляются по экспоненциальному закону. Степень подавления резко увеличивается с увеличением частоты.

4. Постоянная Планка равна 1,05 х 10"2' (г-см2)/с.

5. Timothy Ferris, Coming of Age in the Milky Way. New York: Anchor, 1989, p. 286.

6. Стивен Хокинг. Доклад на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и теории струн, 21 июня 1997 г.

7. Следует отметить, что с помошью фейнмановского подхода к квантовой механике можно вывести подход, основанный на волновых функциях, и наоборот; следовательно, эти два подхода полностью эквивалентны. Однако концепции, терминология и интерпретация, даваемая каждым из этих подходов, различаются очень сильно, несмотря на то, что решения, которые они дают, тождественны.

8. Richard Feynman, QED: The Strange Theory of Light and Matter. Princeton: Princeton University Press, 1988. (Рус. пер.: Феинман Р. Квантовая электродинамика: странная теория света и материи. М.: Наука, 1988 (Библиотечка «Квант». Вып. 66).)

Глава 5

1. Stephen Hawking, A Brief History of Time. New York: Bantam Books, 1988, p. 175. (Рус.

пер.: Хокинг С. От Большого взрыва до черных дыр. М.: Мир, 1998.)

2. Цитируется по книге: Timolhy Ferris, The Whole Shebang. New York: Simon Schuster, 1997, p. 97.

3. Если вы все еще озабочены тем, как вообще что-либо может происходить в пустом пространстве, вы должны понять, что соотношение неопределенностей накладывает ограничения на то, насколько «пустой» может в действительности быть область в пространстве; оно изменяет наше понимание пустого пространства. Например, применительно к волновым возмущениям поля (таким, как электромагнитные волны, распространяющиеся в электромагнитном поле) соотношение неопределенностей утверждает, что амплитуда волны и скорость изменения амплитуды связаны тем же самым отношением обратной пропорциональности, которое выполняется для положения частицы и ее скорости. Чем точнее указана амплитуда, тем менее точно мы знаем скорость, с которой она изменяется. Когда мы говорим, что область в пространстве является пустой, мы обычно имеем в виду, что, помимо всего прочего, в ней не распространяются волны и что все поля имеют нулевую интенсивность. Пользуясь грубым, но очень наглядным языком, можно перефразировать данное выражение, сказав, что амплитуды всех волн, проходящих через данную область, в точности равны нулю. Однако если амплитуды точно известны, то согласно соотношению неопределенностей это означает, что скорость изменения амплитуды является совершенно неопределенной и может принимать любое значение. Но если амплитуда изменяется, это означает, что в следующий момент она уже не может быть нулевой, даже несмотря на то, что область пространства по-прежнему остается «пустой». Опять же, в среднем поле будет нулевым, поскольку в одних областях оно будет принимать положительные значения, а в других – отрицательные; средняя суммарная энергия области не изменится. Но это верно только в среднем. Квантовая неопределенность предполагает, что энергия поля (даже в пустой области пространства) флуктуирует от больших значений к меньшим. При этом амплитуда флутуации увеличивается по мере уменьшения расстояний и промежутков времени, и которых исследуется эта область. Согласно формуле Е = тс2 энергия, заключенная в таких кратковременных флуктуациях, может быть преобразована в массу путем мгновенного образования пары, состоящей из частицы и соответствующей античастицы, которые затем быстро аннигилируют, чтобы сохранить средний баланс энергии.

4. Даже несмотря на то. что первоначальное уравнение Шредингера (то, в котором учитывалась специальная теория относительности) не давало точного описания квантово-механических характеристик электронов в атомах водорода, ученые вскоре поняли, что это ценный инструмент при использовании в надлежащем контексте, который и сегодня еще не вышел из употребления. Однако к тому времени, как Шредингер опубликовал свое уравнение, его опередили Оскар Клейн и Уолтер Гордон, поэтому его релятивистское уравнение носит название уравнения «Клейна-Гордона».

5. Для математически подготовленного читателя заметим, что принципы симметрии, используемые в физике элементарных частиц, обычно основаны на группах, чаще всего на группах Ли. Элементарные частицы систематизируются по представлениям различных групп; уравнения, описывающие эволюцию частиц во времени, должны удовлетворять соответствующим преобразованиям симметрии. Для сильного взаимодействия такой группой симметрии является группа SU(3) (аналог обычных трехмерных вращений, но в комплексном пространстве), при этом три цветовых заряда кварка заданного типа преобразуются по трехмерному представлению. Смещение (от красного, зеленого, синего к желтому, индиго и фиолетовому), которое упомянуто в тексте, если быть более точным, представляет собой SU(3) преобразование, примененное к «цветовым координатам» кварка. Калибровочной является симметрия, в которой групповые преобразования могут зависеть от точек пространства-времени: в этом случае «вращение» цветов кварка будет происходить по-разному в различных точках пространства и в различные моменты времени.

6. При разработке квантовых теорий трех негравитационных взаимодействий физики

также столкнулись с вычислениями, которые приводили к бесконечным результатам. Однако со временем ученые осознали, что от бесконечностей можно из-

бавиться с помощью процедуры, известной как перенормировка. Бесконечности, возникающие при попытках объединить общую теорию относительности и квантовую механику, являются гораздо более серьезными, от них нельзя избавиться с помощью перенормировки. Позднее стало ясно, что бесконечные результаты сигнализируют о том, что теория используется за пределами области своей применимости. Поскольку цель исследований – «окончательная» или «последняя» теория, область применимости которой в принципе не ограничена, физики ищут теорию, в ответах которой не появлялись бы бесконечные величины, независимо от того, насколько экстремальной является анализируемая физическая система.

$\hbar$

$$\sqrt{\hbar G/c^3}$$

$\hbar$

7. Величину планковской длины можно получить с использованием простых рассуждений, основанных на том, что физики называют размерным анализом. Идея состоит в следующем. Когда та или иная теория формулируется в виде набора уравнений, то чтобы теория приобрела связь с действительностью, абстрактным символам должны быть поставлены в соответствие физические характеристики реального мира. В частности, нужно ввести систему единиц измерения. Например, если мы обозначим некоторую длину символом а, то у нас должна быть шкала для интерпретации этого значения. В конце концов, если уравнение говорит нам, что искомая длина равна 5, мы должны знать, означает ли это 5 см, 5 км или 5 световых лет и т. п. В теории, которая включает в себя обшую теорию относительности и квантовую механику, естественный выбор единиц измерения выглядит следующим образом. В природе есть две константы, которые входят в уравнения общей теории относительности: скорость света с и ньютоновская гравитационная постоянная С Квантовая механика определяется постоянной Планка. Исследуя единицы, в которых выражены эти константы (например, с представляет собой скорость и поэтому выражается как расстояние, деленное на время, и т.п.), можно заметить, что величина имеет размерность длины; ее значение составляет 1,616 х 10– 33 см. Это и есть планковская длина. Поскольку она содержит гравитационный и пространственно-временной параметры (G и с), а также квантово-механическую константу (), она устанавливает шкалу для измерений (естественную единицу длины) для любой теории, которая пытается объединить обшую теорию относительности и квантовую механику. Когда мы используем в тексте выражение «планковская длина», мы часто имеем в виду приближенное значение, отличающееся от 10-33 см не более чем на несколько порядков.

8. В настоящее время, помимо теории струн, активно развиваются два других подхода к объединению общей теории относительности и квантовой механики. Один из них, возглавляемый Роджером Пенроузом из Оксфордского университета, известен под названием теории твисторов. Другой подход, появление которого отчасти было инициировано работами Пенроуза, развивается Абхаем Аштекаром из университета штата Пенсильвания, и получил название метода новых переменных. Мы не будем рассматривать эти подходы в данной книге, однако появляются все более обоснованные предположения о том, что они могут иметь глубокую связь с теорией струн, и, возможно, все три подхода ведут к одному и тому же решению проблемы объединения общей теории относительности и квантовой механики.

Глава 6

1. Знающий читатель поймет, что в данной главе рассматривается только пертурбативная теория струн; выходящие за рамки теории возмущений аспекты обсуждаются в главах 12 и 13.

2. Интервью с Джоном Шварцем, 23 декабря 1997 г.

3. Схожие предположения были независимо высказаны Тамиаки Йонея, а также Коркутом Бардакчи и Мартином Гальперном. Значительный вклад в разработку теории струн на ранних этапах ее существования был также сделан шведским физиком Ларсом Бринком.

4. Интервью с Джоном Шварцем. 23 декабря 1997 г.

5. Интервью с Майклом Грином, 20 декабря 1997 г.

6. Стандартная модель предлагает механизм, дающий частицам массу, так называемый механизм Хиггса, получивший свое имя в честь шотландского физика Питера Хиггса. Однако с точки зрения объяснения значений масс частиц, задача здесь просто перекладывается на гипотетическую «частицу, дающую массу» – хиггсовский бозон. В настоящее время ведутся поиски этой частицы, но, опять же, даже если удастся обнаружить ее и определить ее свойства, они будут представлять собой входные данные для стандартной модели, не имеющие никакого теоретического объяснения.

7. Для читателей, имеющих математическую подготовку, укажем, что связь между модами колебаний струны и константами взаимодействия может быть более точно описана следующим образом. При квантовании струны ее возможные состояния, как и состояния любой квантово-механической системы, могут быть представлены векторами в гильбертовом пространстве. Эти векторы могут быть разложены по собственным значениям некоторого набора коммутирующих эрмитовых операторов. Среди этих операторов имеется гамильтониан, собственное значение которого дает энергию и, следовательно, массу этой колебательной моды, а также операторы, генерирующие различные калибровочные симметрии этой теории. Собственные значения этих последних операторов и дают константы взаимодействия, которые несут соответствующие колебательные моды струны.

8. Основываясь на догадках, сделанных в ходе второй революции в теории суперструн (обсуждаемой в главе 12), Виттен и Джо Ликкен (из Национальной лаборатории высокоэнергетических исследований) нашли маленькую, но возможную лазейку

в этом заключении. Используя ее, Ликкен предположил, что струны могут находиться под гораздо меньшим натяжением, и, следовательно, иметь гораздо больший размер, чем считалось первоначально. В действительности они могут оказаться столь большими, что могут быть обнаружены с помощью ускорителей частиц следующего поколения. Если эта маловероятная возможность окажется реальностью, открываются волнующие перспективы того, что многие замечательные следствия теории струн, обсуждаемые в этой и в последующих главах, смогут быть экспериментально проверены в течение ближайшего десятилетия. Но, как мы увидим в главе 9, даже в случае более «традиционного» сценария, разделяемого специалистами по теории струн, согласно которому струны обычно имеют длину порядка I0– 33 см, остаются косвенные методы экспериментальной проверки. 9. Знающий читатель поймет, что фотон, образовавшийся при столкновении электрона и позитрона, является виртуальным и, следовательно, должен быстро высвободить свою энергию путем образования пары частица-античастица. 10. Конечно, камера работает, улавливая отражающиеся от интересующих нас объектов фотоны и регистрируя их на фотопленке. Использование камеры в этом примере является символическим, поскольку мы не представляем себе фотонов, отражающихся от сталкивающихся струн. Мы просто хотим зарегистрировать на рис. 6.7 в всю историю взаимодействия. Сказав это, мы должны обратить ваше внимание на один тонкий момент, о котором умалчивает обсуждение в основном тексте. В главе 4 мы узнали, что квантовая механика может быть сформулирована с использованием фейнмановского метода суммирования по траекториям, в котором движение объектов анализируется путем суммирования вклада всех возможных траекторий, ведущих от выбранной начальной точки к некоторой конечной (каждой траектории в методе Фейнмана сопоставляется статистический вес). На рис. 6.6 и 6.7 мы показали вклад бесконечного числа возможных траекторий, по которым точечные частицы (рис. 6.6) или струны (рис. 6.7) следуют от начальной точки к пункту назначения. Однако приводимое в разделе обсуждение в равной мере применимо и к любой другой возможной траектории, а

значит и ко всему квантово-механическому процессу в целом. (Фейнмановская формулировка квантовой механики точечных частиц с использованием подхода, основанного на суммировании по траекториям, была обобщена на случай теории струн в работах Стэнли Мандельстама из университета штата Калифорния в Беркли и Александра Полякова, в настоящее время работающего на физическом факультете Принстонского университета.)

Глава 7

1. Цитируется по книге R. Clark, Einstein: The Life and Times. New York: Avon Books, 1984, p. 287.

$\hbar/2$

2. Если говорить более точно, спин, равный 1/2, означает, что момент импульса электрона, связанный с его спином, составляет

3. Открытие и развитие понятия суперсимметрии имеет непростую историю. В дополнение к тем, кто указан в тексте, основополагающий вклад внесли Р. Хааг, М. Сониус, Дж. Т. Лопушанский, Ю. А. Гольфанд, Е. П. Лихтман, Дж. Л. Шервэ, Б.Сакита, В. П. Акулов, Д. В. Волков и В. А. Сорока. Некоторые из их работ вошли в обзор Rosanne Di Stefano, Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry. Institute for Theoretical Physics, State University of New York at Stony Brook, preprint ITP-SB-887S.

4. Для читателя, имеющего математическую подготовку, заметим, что это расширение включает дополнение обычных декартовых координат в пространстве-времени новыми, квантовыми координатами, скажем и и v, которые антикоммутируют: и x v – -v x и. Это позволяет рассматривать суперсимметрию как симметрию относительно трансляций в кванюво-механическом расширении пространства-времени.

5. Для читателя, интересующегося деталями этого технического вопроса, заметим следующее. В примечании 6 к главе 6 мы упоминали, что стандартная модель вводит «частицу, даюшую массу», хиггсовский бозон, которая генерирует измеряемые экспериментально массы элементарных частиц, перечисленных в табл. 1.1 и 1.2. Для того чтобы эта процедура работала, хиггеовская частица сама по себе не должна быть слишком тяжелой: проведенные исследования показывают, что ее масса, во всяком случае, не должна превышать примерно I 000 масс протона. Однако окаилось, что квантовые флуктуации могут вносить значительный вклад в массу хиггеовской частицы: это, в принципе, может приводить к массам, близким к планковской. Тем не менее теоретикам удалось установить, что можно избежать этого результата, указывающего на серьезный дефект стандартной модели, путем тонкой настройки некоторых параметров стандартной модели (прежде всего так называемой голой массы хиггеовской частицы) с точностью порядка 10-15. что позволяет нейтрализовать влияние квантовых флуктуации па массу хиггсовской частицы.

6. Один тонкий момент, относящийся к рис. 7.1, состоит в том, что на этом рисунке интенсивность слабого взаимодействия занимает промежуточное положение между интенсивностью сильного и электромагнитного взаимодействия, хотя ранее говорилось, что она слабее всех. Объяснение этому можно найти в табл. 1.2, из которой видно, что частицы-переносчики слабого взаимодействия являются достаточно массивными, тогда как частицы, передающие сильное и электромагнитное взаимодействие, являются безмассовыми. В действительности интенсивность слабого взаимодействия (определяемая соответствующей константой – идея, с которой мы столкнемся в главе 12) является такой, как показано на рис. 7.1, но массивная частица, передающая это взаимодействие, довольно пассивно выполняет свои функции, что приводит

к уменьшению интенсивности этого вида взаимодействия. В главе 14 мы увидим, как вписывается в картину рис. 7.1 гравитационное взаимодействие.

7. Эдвард Виттен, из цикла лекций в память Хайнца Пагельса. г. Аспен, Колорадо, 1997 год.

8. Углубленное обсуждение этой и ряда других смежных идей приведено в книге Steven Weinberg, Dreams of a Final Theory. (Рус. пер.: Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: УРСС. 2004.)

Глава 8

1. Эго простая идея, однако, поскольку несовершенство нашего обычного языка приводит иногда к недопониманию, приведем два пояснения. Во-первых, мы считаем, что муравей живет на поверхности Садового шланга. Если бы муравей мог зарываться вглубь шланга, т. е. если бы он мог проникать внутрь резины, из которой сделан шланг, нам бы потребовалось три числа, чтобы указать его местоположение, поскольку нужно было бы указать, как глубоко он закопался. Однако если муравей живет только на поверхности шланга, то чтобы указать его положение, достаточно двух чисел. Отсюда следует необходимость второго пояснения. Даже тогда, когда муравей живет на поверхности шланга, мы можем, если захотим, указывать его положение с помощью трех чисел: обычных положений в направлениях влево-вправо, вперед-назад и вверх-вниз в нашем привычном трехмерном пространстве. Однако когда известно, что муравей живет на поверхности шланга, два числа, упомянутые в тексте, представляют собой минимальный набор величин, однозначно определяющих положение муравья. Именно это имелось в виду, когда мы говорили, что поверхность шланга двумерна.

2. Как ни удивительно, физики Савас Димопулос, Нима Аркани-Хамед и Гия Двали, основываясь на более ранних догадках Игнатиоса Антониадиса и Джозефа Ликкена, смогли показать, что даже если бы свернутые дополнительные измерения были столь велики, что достигали размера в один миллиметр, они могли бы оставаться необнаруженными экспериментально. Причина состоит в том, что ускорители частиц исследуют микромир с помощью сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Гравитационное взаимодействие, которое при технологически достижимых энергиях остается чрезвычайно слабым, обычно игнорируется. Однако Димопулос с коллегами показали, что свернутые измерения оказывают влияние преимущественно на гравитационное взаимодействие (что выглядит вполне правдоподобно в теории струн); этот эффект вполне мог быть пропущен во всех экспериментах, выполненных до настоящего времени. В ближайшем будущем с использованием высокоточной аппаратуры будут проведены новые эксперименты по изучению гравитационных эффектов, предназначенные для поиска таких «крупных» свернутых измерений. Положительный результат будет означать одно из величайших открытий в истории человечества.

3. Edwin Abbott, Flatland, Princeton: Princeton University Press, 1991. (Рус. пер.: Эббот Э. Флатляндия. М.: Амфора, 2001.)

4. Письмо А. Эйнштейна к Т. Калуце. Цитируется по книге: Abraham Pais, Subtle Is the Lord. New York: Oxford University Press, 1982, p. 330. (Рус. пер.: Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, Физматлит, 1989.)

5. Письмо А.Эйнштейна к Т. Калуце. Цитируется по статье: D. Freedman and P. van Nieuwenhuizen, The Hidden Dimensions of Spacetime, Scientific American, 252(1985), 62.

6. Там же.

7. Физики установили, что в многомерную формулировку труднее всего включить такое понятие стандартной модели как киральность. Поэтому, чтобы не перегружать обсуждение, мы не стали рассматривать это понятие в основном тексте. Для читателей, интересующихся этим вопросом, дадим здесь его краткое описание. Представьте, что кто-то показывает вам фильм, демонстрирующий некоторый научный эксперимент, и предлагает необычное задание – определить, показывает ли фильм сам эксперимент или его отражение в зеркале. Поскольку оператор был очень опытным, никаких признаков наличия зеркала на ленте не видно. Можете ли вы решить эту задачу? В середине 1950-х гг. теоретические работы Т. Д. Ли и Ч. Н.Янга, а также экспериментальные результаты Ц. С. Ву и ее коллег

показали, что вы можете решить эту задачу, если на пленке снят подходящий эксперимент. А именно, их работы доказали, что законы мироздания не обладают полной зеркальной симметрией в том смысле, что зеркальные аналоги некоторых процессов, определяемых слабым взаимодействием, не могут существовать в нашем мире, даже если исходные процессы существуют. Таким образом, если, просматривая фильм, вы увидите, что он демонстрирует один из таких запрещенных процессов, вы будете знать, что наблюдаете зеркальное отражение, а не сам эксперимент. Поскольку зеркальное отражение меняет местами левое и правое, работы Ли, Янга и Ву показали, что Вселенная не обладает полной симметрией левого и правого, или, используя специальную терминологию, что Вселенная является киральной. Именно это свойство стандартной модели (в частности, слабого взаимодействия) физики считали почти невозможным включить в теорию супергравитации высших размерностей. Чтобы избежать недоразумений, отметим, что в главе 10 мы будем обсуждать концепцию теории струн, известную под названием «зеркальной симметрии», но там слово «зеркальная» будет использоваться в совершенно ином смысле.

8. Для читателя, имеющего математическую подготовку, отметим, что многообразие Калаби-Яу представляет собой комплексное кэлерово многообразие с нулевым первым классом Черна. В 1957 г. Калаби высказал предположение, что каждое такое многообразие допускает Риччи-плоскую метрику, а в 1977 г. Яу доказал справедливость этого предположения.

9. Эта иллюстрация была любезно предоставлена Эндрю Хэнсоном из университета штата Индиана, она была создана с использованием графического пакета Mathematica 3-D.

10. Для читателя, имеющего математическую подготовку, заметим, что это конкретное пространство Калаби-Яу представляет собой действительное трехмерное сечение гиперповерхности пятого порядка в комплексном проективном четырехмерном пространстве.

Глава 9

1. Edward Witten, Reflections on the Fate of Spacetime, Physics Today, April 1996, p. 24.

2. Интервью с Эдвардом Виттеном, 11 мая 1998 г.

3. Sheldon Glashow and Paul Ginsparg, Desperately Seeking Superstrings? Physics Today, May 1986, p. 7.

4. Sheldon Glashow. Опубликовано в The Supervorld I, ed. A. Zichichi, New York: Plenum, 1990, p. 250.

5. Sheldon Glashow, Interactions, New York: Warner Books, 1988, p. 335.

6. Richard Feynman. Опубликовано в Superstrings: A Theory of Everything? ed. Paul Davies and Julian Brown, Cambridge, Eng: Cambridge University Press, 1988.

7. Howard Georgi. Опубликовано в The New Physics, ed. Paul Davies, Cambridge: Cambridge University Press 1989, p. 446.

8. Интервью с Эдвардом Виттеном, 4 мая 1998 г.

9. Интервью с Кумруном Вафой, 12 января 1998 г.

10. Цитируется по книге: Robert P. Crease and Charles C. Mann, The Second Creation. New Brunswick, N. J.: Rutgers University Press, 1996, p. 414.

11. Интервью с Шелдоном Глэшоу, 28 декабря 1997 г.

12. Там же.

13. Интервью с Говардом Джорджи, 28 декабря 1997 г. Во время интервью Джорджи также отметил, что экспериментальное опровержение предсказанного распада протонов, которое следовало из предложенной им и Глэшоу первой теории великого объединения (см. главу 7), сыграло существенную роль в его нежелании принять теорию суперструн. Он горько заметил, что его теория великого объединения требует намного больших энергий, чем любая другая теория, когда-либо выносившаяся на суд, и когда его предсказание оказалось неверным, когда «он был нокаутирован природой», его отношение к изучению физики

чрезвычайно высоких энергий резко изменилось. Когда я спросил его, не будет ли для него экспериментальное подтверждение теории великого объединения стимулом включиться в наступление на область планковских масштабов, он ответил: «Да, очень может быть»,

14. David Gross, Superstrings and Unification. Опубликовано в Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics, ed. R. Kotthaus and J. Kuhn. Berlin: Springer-Verlag, 1988, p. 329.

15. Сказав это, следует помнить о возможности, указанной в примечании 8 к главе 6, что струны могут иметь значительно больший размер, чем считалось первоначально, и, следовательно, могут стать объектом прямого экспериментального изучения на ускорителях в течение ближайших десятилетий.

16. Для читателя, имеющего математическую подготовку, заметим, что согласно более точной математической формулировке число семейств равно половине абсолютного значения числа Эйлера для пространства Калаби-Яу. Число Эйлера представляет собой сумму размерностей групп гомологий многообразия, где группы гомологии это то, что мы на нашем нестрогом языке назвали многомерными отверстиями. Таким образом, количество семейств, равное трем, следует из того, что число Эйлера для этих пространств Калаби-Яу равно ±6.

17. Интервью с Джоном Шварцем, 23 декабря 1997 г.

18. Для читателя, имеющего математическую подготовку, заметим, что мы ставим в соответствие многообразию Калаби-Яу конечную нетривиальную фундаментальную группу, порядок которой в некоторых случаях определяет знаменатель дробного заряда.

19. Интервью с Эдвардом Виттеном, 4 марта 1998 г.

20. Для читателей, хорошо знакомых с рассматриваемыми вопросами, заметим, что некоторые из этих процессов нарушают закон сохранения лептонного числа, а также CPT-симметрию (инвариантность относительно изменения знака заряда, четности и направления времени).

Глава 10

1. Отметим для полноты, что хотя большая часть приведенных выше аргументов в равной степени справедлива как для открытых струн (струн со свободными концами), так и для замкнутых струн (которым мы уделяли основное внимание), в рассматриваемом вопросе два типа струн могут, кажется, проявлять различные свойства. Действительно, открытая струна не может быть «насажена» на циклическое измерение. Тем не менее, в результате исследований, сыгравших в конце концов ключевую роль во второй революции суперструн, Джо Польчински из Калифорнийского университета в городе Санта-Барбара и двое его студентов, Джиан-Хюи Дай и Роберт Лей, в 1989 г. продемонстрировали, что открытые струны прекрасно вписываются в схему, которая будет описана в данной главе.

2. Чтобы ответить на вопрос о том, почему возможные энергии однородных колебаний равны целым кратным 1/R, достаточно лишь вспомнить обсуждение квантовой механики (в частности, примера с ангаром) в главе 4. Там мы узнали о том, что согласно квантовой механике энергия, как и деньги, существуют в виде дискретных порций, т. е. в виде целых кратных различных энергетических единиц. В случае однородного колебательного

движения струны во вселенной Садового шланга эта энергетическая единица в точности равна 1/R, как объясняется в основном тексте на основе соотношения неопределенностей. Таким образом, энергия однородных колебаний равна произведению целых чисел на 1/R.

$\sqrt{\alpha'}$

3. Математически равенство энергий струн во вселенной с радиусом циклического измерения R или 1/R есть следствие формулы для энергии v/R+wR, где v – колебательное число, aw– топологическое число. Данное уравнение инвариантно относительно одновременных взаимных замен v на w и R на 1/R, т. е. при перестановке колебательных и

топологических чисел с одновременной инверсией радиуса. Мы используем планковские единицы, но можно работать и в более привычных единицах, если переписать формулу для энергии через так называемую струнную шкалу, значение которого примерно равно планковской длине, т.е. 10~33 сантиметра. В результате энергия записывается в виде выражения v/R + wR/?', инвариантного относительно взаимной замены v на w и R на ?'/R, где последние две величины выражены в стандартных единицах расстояния.

4. У читателя может возникнуть вопрос, каким образом с помощью струны, намотанной вокруг циклического измерения радиусом Я, можно измерить значение радиуса 1/R. Хотя этот вопрос совершенно правомерен, ответ на него, в действительности, заключается в том, что сам вопрос сформулирован некорректно. Когда мы говорим, что струна намотана на окружность радиуса R, мы с необходимостью используем определение расстояния (чтобы фраза «радиус R» имела смысл). Однако это определение расстояния относится к модам ненамотанной струны, т. е. к колебательным модам. С точки зрения этого определения расстояния (и только этого!) конфигурация намотанной струны выглядит так, что струна обернута вокруг циклической компоненты пространства. Однако с точки зрения другого определения расстояния, соответствующего конфигурациям намотанных струн, топологические моды точно так же локализованы в пространстве, как и колебательные моды с точки зрения первого определения, и радиус, который они «видят», равен 1/R, что и отмечено в тексте.

$$|\tilde{x}\rangle = \Sigma_w e^{i\tilde{x}\tilde{p}}|\tilde{p}\rangle$$

$$|\tilde{x}\rangle$$

$$|x\rangle = \Sigma_v e^{ixp}|p\rangle$$

Эти пояснения дают некоторое представление о том, почему расстояния, измеренные с помощью намотанных и ненамотанных струн, обратно пропорциональны друг другу. Однако, так как данный момент достаточно тонкий, возможно, имеет смысл привести технические подробности для читателя, склонного к математическому образу мышления. В обычной квантовой механике точечных частиц расстояние и импульс (по существу, энергия) связаны преобразованием Фурье. Иными словами, собственный вектор оператора координаты \x) на окружности радиусом R можно определить как, где p = v/R, а \p) есть собственный вектор оператора импульса (прямой аналог того, что мы называли общей колебательной модой струны – движение без изменения формы). В теории струн, однако, есть еще один собственный вектор оператора координаты, определяемый состояниями намотанной струны:,

$$\tilde{p} = wR$$

$$|\tilde{p}\rangle$$

где – собственный вектор для намотанной струны с. Из этих определений немед-

$$|x\rangle \text{ и } |\tilde{x}\rangle$$

$$\tilde{x}$$

ленно следует, что x периодична с периодом 2?R, а x периодична с периодом 2?/R, так что x есть координата на окружности радиусом R, а – координата на окружности радиусом 1/R. Более конкретно, можно рассмотреть два волновых пакета, распространяющихся из начала координат и эволюционирующих во времени, с помощью которых можно дать практическое определение расстояния. Радиус окружности, измеренный с помощью каждого из пакетов, будет пропорционален времени возвращения пакета в исходную точку. Так как состояние с энергией E эволюционирует с фазовым множителем, пропорциональным Et, видно, что время, а, следовательно и радиус, равны t ~ 1/E ~ R для колебательных мод и t ~ 1/E ~ 1/R для топологических мод.

$$h^{2,1} \text{ и } h^{1,1}$$

5. Для читателя, сведущего в математике, отметим, что число семейств колебательных мод струны равно половине абсолютного значения эйлеровой характеристики многообразия Калаби-Яу, как указано в примечании 16 к главе 9. Эта величина равна абсолютному значению разности

$h^{p,q}$

где обозначает число Ходжа (p,q). С точ-

$h^{1,1}$

$h^{2,1}$

ностью до константы эти значения равны числу нетривиальных гомологии 3-циклов (трехмерных отверстий) и числу гомологии 2-циклов (двумерных отверстий). Таким образом, хотя в основном содержании говорится о полном числе отверстий, более точный анализ показывает, что число семейств зависит от абсолютного значения разности между числами четномерных и нечетномерных отверстий. Выводы, однако, те же самые. Например, если два пространства Калаби-Яу отличаются перестановкой соответствующих чисел Ходжа и, то число семейств частиц – полное число отверстий – не изменится.

6. Название объясняется тем, что «ромбы Ходжа», математические выражения чисел отверстий различных размерностей для пространств Калаби-Яу, являются зеркальными отражениями друг друга для каждой зеркальной пары.

7. Термин зеркальная симметрия используется в физике и в других контекстах, совершенно не связанных с данным, например, в связи с понятием киральности, т. е. в связи с вопросом о том, является ли Вселенная инвариантной относительно замены правого на левое (см. примечание 7 к главе 8).

Глава 11

1. Для читателя, склонного к математической строгости рассуждений, будет понятно, что вопрос состоит в том, является ли топология пространства динамической, т. е. может ли она меняться во времени. Отметим, что хотя представление о динамических изменениях топологии часто используется в этой книге, на практике обычно рассматривается

однопараметрическое семейство пространственно-временных многообразий, чья топология меняется при изменении параметра семейства. Формально этот параметр не является временем, но в определенном контексте может с ним отождествляться.

2. Для математически подкованного читателя отметим, что процедура включает сдутие рациональных кривых на многообразии Калаби-Яу. Далее используется тот факт, что при определенных условиях образовавшаяся сингулярность может быть устранена серией последовательных раздутий.

3. K. C. Cole, New York Times Magazine, October 18, 1987, p. 20.

Глава 12

1. Цитируется по книге: John D. Barrow, Theories of Everything. New York: Fawcett-Columbine, 1992, p. 13. (В рус. пер. цитата есть в книге: Кузнецов Б. Г. Эйнштейн: Жизнь. Смерть. Бессмертие. М: Наука, 1980, с. 363.)

ετερος

2. Кратко поясним различия между пятью теориями струн. Для этого отметим, что колебательные возбуждения вдоль струнной петли могут распространяться по часовой стрелке и против нее. Теории струн типов IIA и IIB отличаются тем, что в последней теории колебания в обоих направлениях идентичны, а в первой теории противоположны по форме. Противоположность в данном контексте имеет точный математический смысл, но нагляднее всего ее можно представлять в терминах вращений колебательных мод в каждой теории. В теории типа IIB оказывается, что все частицы вращаются в одном направлении (у них одна и та же киральность), а в теории типа IIA – в разных направлениях (у них разная киральность). Тем не менее, в каждой теории реализуется суперсимметрия. Две гетеротические теории имеют аналогичные, но более эффектные отличия. Все моды колебаний по часовой стрелке выглядят так же, как и моды струн типа II (если рассматривать только колебания по часовой стрелке, то теории струн типов ПА и IIB идентичны), но колебания против часовой стрелки

совпадают с колебаниями исходной теории бозонных струн. Хотя в бозонных струнах возникают неразрешимые проблемы, если рассматривать их колебания в обоих направлениях, в 1985 г. Дэвид Росс, Джеффри Харви, Эмиль Мартинек и Райан Ром (все они в то время работали в Принстонском университете и их прозвали «Принстонский струнный квартет») показали, что при использовании этих струн в комбинации со струнами типа II получается вполне согласованная теория. Однако в этом союзе была странная особенность, известная со времен работ Клода Лавлейса из университета Ратчерса 1971 г. и Ричарда Броуэра из Бостонского университета, Питера Годдарда из Кембриджского университета и Чарльза Торна из Гейнсвилльского университета (штат Флорида) 1972 г. А именно, для бозонной струны требовалось 26 пространственно-временных измерений, а для суперструны, как обсуждалось, требовалось 10. Так что гетеротические струны (от греческого, т. е. разный)

являются странными гибридами, в которых колебательные моды против часовой стрелки живут в 26 измерениях, а колебательные моды по часовой стрелке – в 10! Пока читатель окончательно не запутался, пытаясь понять этот странный союз, сообщим ему о работе Гросса и его коллег, в которой было показано, что 16 лишних бозонных измерений должны скручиваться в одно из двух торообразных многообразий очень специального вида, приводя к теориям О– и Е-гетеротических струн. Так как 16 добавочных бозонных измерений компактифицированы, каждая из этих теорий ведет себя так, как если бы в ней было 10 измерений, т.е. как теории струн типа II. В гетеротических теориях также реализован свой вариант суперсимметрии. И, наконец, теория типа I аналогична теории ИВ, за исключением того, что помимо замкнутых струн, рассмотренных в предыдущих главах, в ней имеются струны со свободными концами, называемые открытыми струнами.

3. Понятие «точный» в смысле данной главы (например, «точное» уравнение движения Земли) в действительности относится к точному предсказанию некоторой физической величины в рамках выбранного теоретического формализма. До тех пор, пока у нас не будет истинной окончательной теории (возможно, она уже есть, а возможно, ее вообще не будет) все наши теории сами являются приближениями реальности. Но это понятие приближения не имеет никакого отношения к приближениям, рассматриваемым в данной главе. Здесь нас интересует тот факт, что в рамках выбранной теории часто сложно или невозможно сделать точные предсказания. Вместо этого приходится искать эти предсказания с помощью приближенных методов в рамках теории возмущений.

4. Эти диаграммы являются струйными вариантами так называемых диаграмм Фейнмана, предложенных Ричардом Фейнманом для вычислений по теории возмущений в квантовой теории поля точечных частиц.

5. Точнее, каждая пара виртуальных струн, т. е. каждая петля конкретной диаграммы, приводит (наряду с другими более сложными слагаемыми) к мультипликативному вкладу, пропорциональному константе связи струны. Чем больше петель, тем выше показатель степени константы связи струны в ответе. Если константа связи струны меньше 1, повторные умножения сделают вклад следующих петель меньше, в противном случае эти вклады будут того же порядка или будут растут с числом петель.

6. Для читателя, осведомленного в математике, отметим, что в силу этого уравнения пространство-время должно иметь Риччи-плоскую метрику. Если разбить пространство-время на прямое произведение четырехмерного пространства Минковского и шестимерного компактного кэлерова многообра-

зия, то обращение в нуль кривизны Риччи будет эквивалентно требованию того, что кэлерово многообразие должно быть многообразием Калаби– Яу. Вот почему многообразия Калаби-Яу так важны в теории струн.

7. Разумеется, ничто не гарантирует правомочность таких косвенных подходов. Например, некоторые лица несимметричны, а в физике могут быть законы, разные в далеко удаленных частях Вселенной (это вкратце обсуждается в главе 14).

8. Для знающего читателя должно быть ясно, что для справедливости этих

утверждений потребуется так называемая N = 2 суперсимметрия.

$g_{ОГ} = 1/g_{I}$ или $g_{I} = 1/g_{ОГ}$

g_{I}

$g_{ОГ}$

9. Более точно, если обозначить константу связи О-гетеротической струны символом, а константу связи струны типа I символом, то соотношение между константами, для которых состояния в данных физических теориях эквивалентны, имеет вид. Если одна из констант связи мала, то другая константа велика, и наоборот.

g_{IIB} и $1/g_{IIB}$

g_{IIB}

10. Это близкий аналог рассмотренной выше (R, 1/R) дуальности. Если обозначить константу связи струны типа IIB через, то кажется правдоподобной гипотеза, что значения констант приводят к одинаковым физическим результатам. Если

g_{IIB} велико, то $1/g_{IIB}$

мало, и наоборот.

11. Если свернуты все измерения, кроме четырех, то в теории с двенадцатью измерениями и более обязательно возникнут безмассовые частицы со спиом, большим 2, что неприемлемо ни с теоретической, ни с экспериментальной точек зрения.

12. Заметным исключением явилась важная работа 1987 г. Даффа, Поля Хоува, Такео Ииами и Келлога Стелле, в которой более ранние наблюдения Эрика Бергшоеффа, Эргина Сезгина и Таунсенда использовались для обоснования того, что десятимерная теория струн может иметь глубокую связь с 11-мерной теорией.

13. Более точно, эту диаграмму следует интерпретировать в том смысле, что у нас есть единственная теория, которая зависит от нескольких параметров. В число этих параметров входят константы связи, а также геометрические размеры и форма. В принципе теорию можно использовать для вычисления определенных значений всех этих параметров, но в настоящий момент неясно, как выполнить такие расчеты. Поэтому, чтобы лучше разобраться в этой теории, физики исследуют ее свойства при всевозможных значениях параметров. Если параметры выбираются в любой из шести полуостровных частей рис.12.11, свойства теории будут наследоваться одной из пяти теорий струи или 11 -мерной супергравитацией, как отмечено на рисунке. Если параметры выбираются в центральной части, физическими законами будет управлять все еще мистическая М-теория.

14. Следует отметить, однако, что даже в полуостровных областях существует ряд экзотических типов влияния бран на обычную физику. Например, высказывалось предположение, что три наших протяженных измерения могут сами быть крупной и несвернутой 3-браной. Если это предположение справедливо, то всю свою жизнь мы просто скользим по внутренности трехмерной мембраны. В настоящее время проводится анализ подобных гипотез. 15. Интервью с Эдвардом Виттеном, II мая 1998 г.

Глава 13

1. Знающему читателю будет понятно, что при преобразованиях зеркальной симметрии коллапсирующая трехмерная сфера одного пространства Калаби-Яу отображается на коллапсирующую двумерную сферу другого пространства Калаби-Яу, приводя, на первый взгляд, к той же ситуации флоп-перестроек, которая рассматривалась в главе 11. Разница, однако, в том, что в подобном зеркальном описании антисимметричное тензорное поле B v (действительная часть комплексной кэлеровой формы на зеркальном пространстве Калаби-Яу) обращается в нуль, и сингулярность гораздо сильнее, чем в случае, который описывался в главе 11.

2. Более точно, примерами экстремальных черных дыр являются черные дыры с минимальными для данных зарядов массами, в полной аналогии с рассмотренными в главе 12 БПС-состояниями. Такие черные дыры будут играть важнейшую роль при обсуждении

энтропии черной дыры.

3. Излучение черной дыры должно быть подобно излучению теплоты раскаленным камином. Это как раз та проблема, которая обсуждалась в главе 4 и сыграла важнейшую роль в развитии квантовой механики.

4. Так как черные дыры, участвующие в конифолдных переходах с разрывом пространства, являются экстремальными, оказывается, что ни при каких малых массах они не излучают по Хокингу.

5. Лекция Стивена Хокинга, прочитанная на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и струнам, 21 июня 1996 г.

6. В первых расчетах Строминджера и Вафы обнаружилось, что математические выкладки становятся проще, если работать с пятью, а не четырьмя протяженными пространственно-временными измерениями. После завершения вычислений энтропии пятимерной черной дыры они с удивлением обнаружили, что еще никто не построил такие гипотетические экстремальные черные дыры в формализме лятимерной обшей теории относительности. А так как результаты можно было проверить лишь сравнив ответ с площадью горизонта событий гипотетической черной дыры, Строминджер и Вафа занялись построением подобной пятимерной черной дыры. И им это удалось. Дальше уже не представляло труда показать, что результат для энтропии в теории струн, полученный на основе анализа микроскопических свойств, согласуется с предсказанием Хокинга, сделанным на основе площади поверхности горизонта событий черной дыры.

После публикации их работы многим теоретикам, среди которых необходимо отметить принстонского физика Кертиса Каллана и его последователей, удалось вычислить энтропию для более привычного случая четырех протяженных пространственно-временных измерений, и все эти вычисления подтвердили правильность предсказания Хокинга.

7. Интервью с Шелдоном Глэшоу, 29 декабря 1997 г.

8. Laplace, Philosophical Essay on Probabilities, trans. Andrew I. Dale. New York: Springer-Verlag, 1995. (См. рус. изд.: Лаплас. Опыт философской теории вероятности. М., 1908.)

9. Цитируется по книге: Stephen Hawking and Roger Penrose, The Nature of Space and Time. Princeton: Princeton University Press, 1995, p. 41. (Рус. пер.: Хокинг С, Пенроуз Р. Природа пространства и времени. Ижевск: РХД, 2000.)

10. Лекция Стивена Хокинга, прочитанная на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и струнам, 21 июня 1997 г.

11. Интервью с Эндрю Строминджером, 29 декабря 1997 г.

12. Интервью с Кумруном Вафой, 12 января I99S г.

13. Лекция Стивена Хокинга, прочитанная на Амстердамском симпозиуме по гравитации, черным дырам и струнам, 21 июня 1997 г.

14. Это в определенной мере связано с вопросом о потере информации, который обсуждается в последние годы. Некоторые физики придерживаются идеи о возможности существования внутри черной дыры «ядра», где хранится вся информация, которую перенесли тела, попавшие под горизонт событий черной дыры.

15. В действительности, конифолдные переходы с разрывом пространства, рассмотренные в этой главе, затрагивают черные дыры. Поэтому может показаться, что анализ снова упирается в проблему сингулярностей черных дыр. Вспомним, однако, что конифолд возникает в тот момент, когда масса черной дыры становится нулевой, следовательно, данный вопрос не имеет прямого отношения к проблеме сингулярностей черных дыр.

Глава 14

1. Более точно, в данном температурном диапазоне Вселенная должна быть заполнена фотонами в соответствии с законами излучения идеально поглощающего тела (абсолютно

черного тела на языке термодинамики). Тот же спектр излучения на квантово-механическом уровне имеют, согласно Хокингу, черные дыры, или, согласно Планку, раскаленный камин.

2. В обсуждении правильно передан смысл общей идеи, но опущены некоторые тонкие моменты, относящиеся к распространению света в расширяющейся Вселенной. Учет этих моментов влияет на конкретные численные значения. В частности, хотя в специальной теории утверждается, что никакие объекты не могут двигаться быстрее света. из нее не следует, что два фотона, движущихся по расширяющемуся пространству, должны удаляться друг от друга со скоростью, не превышающей скорость света. Например, в период «просветления» Вселенной (примерно через 300 000 лет после Большого взрыва) две области, разделенные расстоянием около 900 000 световых лет, могли ранее участвовать в энергетическом обмене, хотя это расстояние превышает 300000 световых лет. Увеличение допустимого расстояния втрое объясняется расширением структуры пространства. Оно означает, что при обратной перемотке пленки к моменту 300 000 лет после Большого взрыва минимальное расстояние, при котором будет возможен теплообмен, равно 900 000 световых лет. Конкретные значения не влияют на правильность качественного анализа ситуации.

3. Подробное и живое обсуждение открытия инфляционной космологической модели и решаемых ею проблем можно найти в книге Alan Guth, The Inflationary Universe. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1997.

4. Для приверженцев математической строгости обсуждений приведем главную мысль, лежащую в основе этого вывода. Если сумма пространственно-временных размерностей траекторий, заметаемых двумя объектами, не меньше размерности пространственно-временной области, в которой они движутся, траектории, вообще говоря, будут пересекаться. Например, точечные частицы заметают одномерные пространственно-временные траектории, и сумма равна двум. Размерность пространства-времени Линляндии тоже равна двум, и траектории будут пересекаться (в предположении, что скорости частиц не подогнаны точно). Аналогично, струны заметают двумерные пространственно-временные траектории (мировые поверхности); сумма равна четырем. Поэтому движущиеся в четырех (трех пространственных и одном временном) измерениях струны, вообще говоря, должны сталкиваться.

5. С открытием М-теории и одиннадцатого измерения теоретики начали искать способы свертывания всех семи добавочных измерений более или менее равноправным образом. Для компактификации могут использоваться семимерные многообразия, которые называют многообразиями Джойса, по фамилии Доменика Джойса из Оксфордского университета, впервые предложившего метод их математического построения.

6. Интервью с Кумруном Вафой, 12 января 1998 г.

7. Искушенный читатель заметит, что наше описание относится к так называемой струнной системе отсчета, в которой увеличение кривизны в период до Большого взрыва обусловлено увеличением (благодаря дилатону) силы гравитационного воздействия. В так называемой эйнштейновской системе отсчета эволюция описывалась бы фазой ускоренного сжатия.

8. Интервью с Габриэле Венециано, 19 мая 1998 г.

9. Идеи Смолина излагаются в его книге: L. Smolin. The Life of the Cosmos. New York: Oxford University Press, 1997.

10. Например, в теории струн эти мутации могут объясняться небольшими изменениями вида свернутых измерений у потомков. Из результатов о кони-фолдных переходах с разрывом пространства ясно, что достаточно длинная цепочка таких небольших изменений может привести к превращению одного пространства Калаби-Яу в любое другое, позволяя мульти-вселенной судить об эффективности воспроизводства всех ее вселенных на основе аргументов теории струн. Согласно гипотезе Смолина, после того, как сменится достаточно много поколений, можно ожидать, что компонента Калаби-Яу типичной вселенной будет оптимальна для воспроизведения потомства.

Глава 15

1. Интервью с Эдвардом Виттеном, 4 марта 1998 г.

2. Некоторые теоретики усматривают указание на эту идею в голографическом принципе – концепции, выдвинутой Сасскиндом и известным датским физиком Герардом 'т Хофтом. Подобно тому, как на голограмме можно воспроизвести трехмерное изображение, используя специальным образом изготовленную двумерную пленку, все физические явления, согласно Сасскинду и 'тХофту, можно полностью закодировать уравнениями, определенными в мире меньшей размерности. И хотя это может показаться столь же неординарным, сколь и рисование портрета человека по его тени, можно уловить смысл этого утверждения и понять некоторые аргументы Сасскинда и 'тХофта, вспоминая обсуждение энтропии черных дыр из главы 13. Напомним, что энтропия черной дыры определяется площадью поверхности ее горизонта событий, а не полным объемом, который ограничен этим горизонтом. Поэтому беспорядок черной дыры, а, следовательно, и хранимая в ней информация об этом беспорядке, закодированы двумерными данными на поверхности. Все происходит примерно так, как если бы горизонт черной дыры играл роль голограммы, запечатлевающей весь объем информации во внутренней трехмерной области. Сасскинд и 'тХофт обобщили эту идею на всю Вселенную и предположили, что все происходящие «внутри» Вселенной события есть просто отражение данных и уравнений, определенных на далекой поверхности ее границы. Недавние результаты гарвардского физика Хуана Маддасены, а также последовавшие важные работы Виттена и принстонских физиков Стивена Губсера, Игоря Клебанова и Александра Полякова показали, что (по крайней мере, в ряде конкретных случаев) в теорию струн заложен голографический принцип. В конструкции, которая в настоящее время интенсивно исследуется, управляемые теорией струн физические законы Вселенной имеют эквивалентное описание в терминах законов, относящихся лишь к граничной поверхности, размерность которой с необходимостью меньше, чем размерность пространства внутри. Некоторые теоретики считают, что полное понимание смысла голографического принципа и его роли в теории струн приведет к третьей революции в теории суперструн.

3. Цитируется но книге: Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World, trans. Motte and Cajori. Berkeley: University of California Press, 1962, v. I, p. 6. (Рус. пер.: Исаак Ньютон. Математические начала натуральной философии. М.: Наука, 1989.)

4. Если читатель знаком с линейной алгеброй, ему можно предложить простой способ представить себе некоммутативную геометрию: обычные декар-

товы координаты, для которых умножение коммутативно, можно считать матрицами, которые не коммутируют.

5. Интервью с Кумруном Вафой, 12 января 1998 г.

6. Интервью с Эдвардом Виттеном, 11 мая 1998 г.

7. Banesh Hoffman and Helen Dukas, Albert Einstein, Creator and Rebel. New York: Viking, 1972, p. 18.

8. Martin J. Klein, Einstein: The Life and Times, by R.W.Clark. Science 174, pp. 1315-16.

9. Jacob Bronkowski, The Ascent of Man. Boston: Little, Brown, 1973, p.

Словарь научных терминов

Абелева калибровочная симметрия. Калибровочная симметрия в квантовой электродинамике.

Абсолютный нуль. Наинизшая возможная температура, равная О К или примерно -273° С.

Амплитуда. Максимальная высота вершины волны или минимальная глубина впадины волны.

Антиматерия. Материя, имеющая гравитационные свойства обычной материи, но противоположные по знаку электрический заряд и константы взаимодействия ядерных сил.

Античастица. Частица антиматерии.

Антропный принцип. Учение, объясняющее наблюдаемые свойства Вселенной тем, что при других свойствах возникновение жизни было бы маловероятно, и, следовательно, не было бы наблюдателей, способных увидеть эти отличия.

Атом. Фундаментальная строительная единица материи, состоящая из ядра (в которое входят протоны и нейтроны) и движущихся по орбитам электронов.

Безмассовая черная дыра. Особый тип черных дыр в теории струн, начальные массы которых могут быть велики, но уменьшаются по мере сжатия части многообразия Калаби-Яу. Когда эта часть пространства сжимается в точку, изначально массивные черные дыры становятся безмассовыми. В таком состоянии черная дыра не обладает более такими обычными для черных дыр свойствами, как горизонт событий.

Бесконечности. Бессмысленные результаты, характерные для вычислений в общей теории относительности и квантовой механике в формулировках, основанных на понятии точечной частицы.

Бозон. Частица или колебательная мода струны с целочисленным спином; как правило, бозоны являются частицами-переносчиками взаимодействий.

Большое сжатие. Гипотеза о том, что в будущем расширение Вселенной прекратится, сменится сжатием и закончится коллапсом всего пространства и всей материи; понятие, противоположное понятию Большого взрыва.

Большой взрыв. Принятая в настоящее время теория, суть которой состоит в том, что расширяющаяся Вселенная родилась около 15 миллиардов лет назад из состояния с огромной энергией, плотностью и степенью сжатия.

Брана. Любой протяженный объект в теории струн. 1-брану называют струной, 2-брану называют мембраной; у 3-браны имеются три протяженных измерения, и т. д. В общем случае, p-брана имеет p пространственных измерений.

Великое объединение. Класс теорий, объединяющих три негравитационных взаимодействия в рамках единого формализма.

Виртуальные частицы. Частицы, которые на мгновение извергаются из вакуума; в соответствии с соотношением неопределенностей, они существуют за счет заимствованной из вакуума энергии и быстро аннигилируют, возвращая тем самым энергетический долг.

Волновая функция. Вероятностные волны; понятие, на основе которого строится квантовая механика.

Вторая революция в теории суперструн. Этап развития теории струн, начавшийся примерно в 1995 г., когда начали проясняться некоторые непертурбативные аспекты теории.

Второе начало термодинамики. Закон, согласно которому полная энтропия постоянно растет.

Гладкий, гладкое многообразие. Область пространства, в которой его структура является плоской или гладко искривленной, и не имеет никаких зажимов, разрывов или складок.

Глюон. Наименьший сгусток поля ядерных сил; частица, передающая сильное взаимодействие.

Горизонт событий. Характерная для черной дыры поверхность «в направлении только туда»: согласно законам гравитации, после пересечения этой поверхности обратного пути нет, настолько сильно гравитационное притяжение черной дыры.

Гравитационное взаимодействие. Самое слабое из четырех типов фундаментальных взаимодействий в природе. Описывалось сначала теорией тяготения Ньютона, а затем общей теорией относительности Эйнштейна.

Гравитон. Наименьший сгусток поля гравитационных сил; частица, передающая гравитационное взаимодействие.

Двумерная сфера. См. сфера.

Детерминизм Лапласа. Идея Вселенной как часового механизма, состоящая в том, что полное знание состояния Вселенной в заданный момент времени полностью определяет ее состояния в будущие и прошлые моменты.

Длина волны. Расстояние между соседними горбами или впадинами волны.

Дуальность сильной и слабой связи. Ситуация, в которой теория с сильной связью оказывается дуальной, т. е. физически эквивалентной, теории со слабой связью.

Дуальный, дуальность, дуальные симметрии. Ситуация, в которой две или более теорий кажутся совершенно различными, но в действительности приводят к одинаковым физическим следствиям.

Единая теория, единая теория поля. Любая теория, описывающая все четыре типа взаимодействий и все типы материи в рамках единого универсального формализма.

Замедление времени. Эффект специальной теории относительности, согласно которому для движущегося наблюдателя течение времени замедляется.

Замкнутая струна. Струна, имеющая вид петли.

Заряд. Свойство частицы, определяющее способность частицы к взаимодействию определенного типа. Например, электрический заряд определяет поведение частицы при электромагнитном взаимодействии.

Зеркальная симметрия. В контексте теории струн это симметрия, благодаря которой два различных многообразия Калаби-Яу, выбранные в качестве свернутых измерений, приводят к одинаковым физическим результатам. Такие многообразия называются зеркальной парой.

Излучение. Перенос энергии волнами или частицами.

Измерение. Независимая ось или направление в пространстве или пространстве-времени. Пространство вокруг нас имеет три измерения (направления слева-направо, сзади-вперед, снизу-верх), а наше пространство-время имеет четыре измерения (три уже упомянутых оси а также ось из прошлого в будущее). В теории суперструн требуется, чтобы Вселенная имела дополнительные пространственные измерения.

Интерференционная картина. Волновая картина, возникающая в результате наложения и смешения волн, излучаемых из различных точек.

Инфляция, инфляционная космология. Модификация стандартной космологической модели Большого взрыва, в которой предполагается, что на ранних этапах развития Вселенная претерпевает колоссальное расширение с огромной скоростью.

Калибровочная симметрия. Симметрия, лежащая в основе квантово-механического описания трех негравитационных взаимодействий; она означает инвариантность физической системы относительно различных сдвигов значений зарядов, которые могут меняться от точки к точке в пространстве-времени.

Калибровочная симметрия слабого взаимодействия. Калибровочная симметрия, лежащая в основе слабого взаимодействия.

Калибровочный бозон слабого взаимодействия. Наименьший сгусток поля слабого взаимодействия', частица, передающая слабое взаимодействие; различают W-бозоны и Z-бозоны.

Картина колебаний. Точное число горбов и впадин (а также их амплитуда) колеблющейся струны.

Квантовая геометрия. Модификация римановой геометрии, необходимая для точного описания физических свойств пространства на ультрамикроскопических масштабах, где важную роль начинают играть квантовые эффекты.

Квантовая гравитация. Теория, объединяющая квантовую механику и общую теорию относительности (возможно, с изменениями). Теория струн является примером теории квантовой гравитации.

Квантовая клаустрофобия. См. квантовые флуктуации.

Квантовая механика. Свод физических законов, действующих во Вселенной, чьи нетривиальные свой-

ства, например, соотношение неопределенностей, квантовые флуктуации и корпускулярно-волновой дуализм, становятся ярко выраженными на микроскопических масштабах атомов и субатомных частиц.

Квантовая пена. См. пространственно-временная пена.

Квантовая теория поля. См. релятивистская квантовая теория поля.

Квантовая теория электрослабых взаимодействий. См. теория электрослабых взаимодействий.

Квантовая хромоаииамика (КХД). Релятивистская квантовая теория поля, описывающая сильное взаимодействие и свойства кварков.

Квантовая электродинамика (КЭД). Релятивистская квантовая теория поля, описывающая электроны и электромагнитное взаимодействие.

Квантовые флуктуации. Случайное поведение системы на микроскопических масштабах вследствие соотношения неопределенностей.

Квантово-механическое туннелирование. Квантово-механическое явление, состоящее в том, что объекты могут проходить сквозь препятствия, которые, с точки зрения классических законов Ньютона, являются непреодолимыми.

Квантовый детерминизм. Свойство квантовой механики, состоящее в том, что знание квантового состояния системы в некоторый момент времени полностью определяет квантовое состояние системы в прошедшие и будущие моменты времени. Знание квантового состояния, однако, определяет лишь вероятность того или иного будущего.

Кванты. Мельчайшие единицы, на которые, в соответствии с законами квантовой механики, дробятся другие физические сущности. Например, фотоны являются квантами электромагнитного поля.

Кварк. Частица материи, участвующая в сильных взаимодействиях. Есть шесть разновидностей кварков (и, d, с, s. t, b), и каждый их них имеет Три «цвета» (красный, зеленый, синий).

Киральный, киральность. Свойство физики элементарных частиц, состоящее в различии правого и левого, и указывающее на то, что Вселенная является несимметричной относительно замен правого и левого.

Колебательное число. Целое число, описывающее энергию однородных колебаний струны; эта энергия соответствует движению струны как единого целого, в противоположность энергии, связанной с изменением ее формы.

Конифолдный переход. Эволюция пространства Калаби-Яу, являющегося частью Вселенной, при которой структура пространства разрывается и восстанавливается сама собой. Физические следствия такого перехода являются мягкими и допустимыми в рамках теории струн. Характер разрывов более серьезный, чем в случае флоп-перестройки.

Константа связи. См. Константа связи струны.

Константа связи струны. Положительное число, определяющее вероятность основных процессов в теории струн – распада одной струны на две или соединения двух струн в одну. В каждой теории струн имеется своя константа связи, значение кото-

рой должно вычисляться из некоторого уравнения. В настоящее время подобные уравнения недостаточно изучены для того, чтобы из них можно было получить какую-либо полезную информацию. Если константа связи меньше I, применимы методы теории возмущений.

Корпускулярно-волиовой дуализм. Фундаментальное понятие квантовой механики, состоящее в том, что объекты проявляют как волновые свойства, так и свойства частиц.

Космологическая постоянная. Постоянная, вводимая в исходные уравнения общей теории относительности для получения решения, описывающего статическую Вселенную; она интерпретируется как постоянная плотность энергии вакуума.

Кривизна. Отклонение объекта, пространства или пространства-времени от плоской формы и, тем самым, отклонение от законов евклидовой геометрии.

Лоренцевское сокращение. Эффект специальной теории относительности, вследствие

которого движущееся тело оказывается укороченным в направлении его движения.

Макроскопический. Относящийся к масштабам, с которыми люди сталкиваются в повседневной жизни, а также к более крупным масштабам; противоположный микроскопическому.

Мировая поверхность. Двумерная поверхность, заметаемая струной при ее движении.

Многомерное отверстие. Обобщение понятия отверстия тора на случай высших размерностей.

Мода струны. Конфигурация (колебательная мода, топологическая мода), в которой может находиться струна.

М-теория. Теория, возникшая во время второй революции в теории суперструн, и объединяющая пять ранее известных теорий суперструн в рамках одного всеобъемлющего формализма. В М-теории одиннадцать пространственно-временных измерений; многие ее свойства до сих пор не изучены.

Мульти-вселенная. Гипотетическое обобщение, в котором наша Вселенная является лишь одной из огромного числа отдельных и самостоятельных вселенных.

Наблюдатель. Идеальное лицо или устройство, измеряющее определенные свойства физической системы.

Нарушение симметрии. Понижение симметрии, присущей системе, обычно связываемое с фазовым переходом.

Начальные условия. Данные, описывающие исходное состояние физической системы.

Нейтрино. Электрически нейтральная частица, участвующая лишь в слабых взаимодействиях.

Нейтрон. Электрически нейтральная частица, обычно находящаяся в ядре атома; нейтрон состоит из трех кварков (двух А -кварков и одного и-кварка).

Нульмерная сфера. См. сфера.

Ньютоновская механика. Законы, описывающие движение тел исходя из понятия абсолютного пространства и времени; эти законы господствовали в фи-

зике до создания Эйнштейном специальной теории относительности.

Ньютоновская универсальная теория тяготения. Теория тяготения, в которой сила притяжения между двумя точечными неподвижными телами пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Позже эта теория была заменена эйнштейновской общей теорией относительности.

Обратный. Обратный данному числу; например, обратное 3 равно 1/3, обратное 1/2 есть 2.

Общая теория относительности. Эйнштейновская формулировка теории гравитации, в которой пространство-время, вследствие его кривизны, передает гравитационное взаимодействие.

Однородные колебания. Движение струны как единого целого без изменения формы.

Однопетлевой вклад. Вклад вычислений по теории возмущений для процесса, в котором участвует одна виртуальная пара струн (или частиц, в теории точечных частиц).

Открытая струна. Струна с двумя свободными концами.

Пена. См. пространственно-временная пена.

Первичный нуклеосинтез. Образование атомных ядер, происходившее в течение первых трех минут после Большого взрыва.

Переход с изменением топологии. Эволюция структуры пространства, в ходе которой пространство разрывается, что приводит к изменению его топологии.

Плаиковская длина. Составляет около 10' 33 см. Масштаб, ниже которого квантовые флуктуации структуры пространства-времени становятся громадными. Характерный размер струны в теории струн.

Плаиковская масса. Приблизительно 10" массы протона или приблизительно 10~3 г; примерная масса небольшой пылинки. Характерная масса колеблющейся струны в теории струн.

Планковская энергия. Приблизительно 1 000 кВт • ч. Энергия, необходимая для изучения явлений на масштабах планковской длины. Характерная энергия колеблющейся струны в теории струн.

Планковское время. Приблизительно 10~43 с. Время, когда размер Вселенной был примерно равен планковской длине; точнее, время, за которое свет проходит расстояние, равное планковской длине.

Планковское натяжение. Приблизительно 1039 т. Характерное натяжение струны в теории струн.

Плоский. Подчиняющийся законам евклидовой геометрии; имеющий форму, похожую на поверхность совершенно гладкого стола, а также многомерные обобщения подобных объектов.

Подход с использованием теории возмущений. См. теорию возмущений.

Поле, поле сил. С макроскопической точки зрения это способ передачи действия силы; поле описывается набором чисел в каждой точке пространства, задающим величину и направление силы в этой точке.

Постоянная Планка. Фундаментальная квантово-механическая константа, обозначаемая символом й. Она определяет масштаб дискретных значений энергии.

массы, спина, и т.д. на микроскопическом уровне. Ее значение равно 1,05 х 10-27 (г-см2)/с.

Принцип относительности. Фундаментальный принцип специальной теории относительности, постулирующий, что все наблюдатели, движущиеся с постоянной скоростью, испытывают действие одних и тех же физических законов и, следовательно, каждый наблюдатель, движущийся с постоянной скоростью, вправе утверждать, что он находится в покое. Этот принцип обобщается принципом эквивалентности.

Принцип эквивалентности. Фундаментальный принцип общей теории относительности, постулирующий невозможность отличить ускоренное движение от погружения в гравитационное поле (для достаточно малых областей наблюдения). Обобщает принцип относительности, утверждая, что любой наблюдатель, вне зависимости от характера его движения, может считаться покоящимся, если только допускается наличие подходящего гравитационного поля.

Проблема горизонта. Космологический парадокс, связанный с тем, что области Вселенной, разделенные огромными расстояниями, имеют, тем не менее, практически одинаковые свойства (например, температуру). Решение проблемы предлагает инфляционная космология.

Произведение. Результат умножения двух чисел.

Пространственно-временная пена. Пенистая, волнистая и нерегулярная структура ткани пространства-времени на ультрамикроскопических масштабах с точки зрения теории точечных частиц. Эта пена являлась главной причиной несовместимости квантовой механики и общей теории относительности до формулировки теории струн.

Пространство Калаби-Яу, многообразие Калаби-Яу. Пространство (многообразие), в которое в теории струн могут сворачиваться дополнительные пространственные измерения; вид пространства согласован с уравнениями движения.

Пространство-время. Объединение пространства и времени, первоначально появившееся в специальной теории относительности. Его можно рассматривать как «ткань», из которой скроена Вселенная; пространство-время представляет собой динамическую арену, на которой разыгрываются все события во Вселенной,

Протон. Положительно заряженная частица, обычно находящаяся в ядре атома; протон состоит из трех кварков (двух u-кварков и одного d-кварка).

Протяженное измерение. Пространственное (или пространственно-временное) измерение больших размеров, являющееся непосредственно наблюдаемым; измерение, известное из опыта, в противоположность свернутому измерению.

Резонанс. Одно из естественных состояний колебательной физической системы.

Реликтовое излучение. Микроволновое излучение во Вселенной, рожденное в момент Большого взрыва; по мере расширения Вселенной его плотность и энергия уменьшаются.

Релятивистская квантовая теория поля. Квантово-механическая теория поля (например, электромагнит-

ного), в которую заложены принципы специальной теории относительности.

Решение Шварцшильда. Решение уравнений общей теории относительности для случая сферически-симметричного распределения материи; одним из следствий этого решения является возможность существования черных дыр.

Риманова геометрия. Математический формализм описания искривленных пространств любой размерности. Играет центральную роль в эйнштейновском описании пространства-времени в общей теории относительности.

Свернутое (компактифицированное) измерение. Пространственное измерение, протяженность которого недостаточна для того, чтобы это измерение было наблюдаемым; пространственное измерение, которое смято, скручено или сжато до крайне малого размера, вследствие чего его непосредственное обнаружение невозможно.

Световые часы. Гипотетические часы, измеряющие время подсчетом числа пролетов одного фотона, движущегося между двумя зеркалами.

Семейства. Разделение частиц материи на три группы, каждую из которых называют семейством. Частицы каждого последующего семейства отличаются от частиц предыдущего большими массами, но имеют те же электрические и ядерные заряды.

Сильное взаимодействие. Сильнейшее из четырех видов взаимодействия, удерживающее кварки внутри протонов и нейтронов, а протоны и нейтроны внутри атомных ядер.

Симметрия. Свойство физической системы, состоящее в том, что эта система не изменяется при определенных преобразованиях. Например, сфера симметрична относительно вращений, так как при вращениях ее вид не изменяется.

Симметрия сильных взаимодействий. Калибровочная симметрия, лежащая в основе сильного взаимодействия, выражающаяся в неизменности системы при сдвигах цветовых зарядов кварков.

Сингулярность. Место, где структура пространства или пространства-времени претерпевает сильный разрыв.

Скорость. Быстрота и направление движения объекта.

Слабое взаимодействие, слабые ядерные силы. Один из четырех типов фундаментальных взаимодействий, наиболее известный благодаря радиоактивному распаду.

Соотношение неопределенностей. Открытый Гейзенбергом принцип квантовой механики, состоящий в том, что некоторые из свойств Вселенной, например, положение и скорость частицы, не могут быть известны абсолютно точно. Неопределенный характер микромира становится все более выраженным, по мере того как пространственные и временные масштабы, на которых рассматриваются эти свойства, становятся все меньше. Величины, характеризующие частицы и поля, колеблются и резко изменяются в пределах значений, допустимых соотношением неопределенностей. Это означает, что микромир представляет собой царство хаоса, погруженное в море квантовых флуктуации.

Состояния БПС. Состояния суперсимметричной теории, свойства которых полностью определяются из соображений симметрии.

Специальная теория относительности. Предложенные Эйнштейном законы о свойствах пространства и времени в отсутствие гравитации (см. также общая теория относительности).

Спин. Квантово-механическое понятие, соответствующее моменту импульса в классической механике. У частиц есть «врожденное» количество спина, равное целому или полуцелому числу (в единицах постоянной Планка), которое никогда не изменяется.

Стандартная космологическая модель. Теория Большого взрыва, дополненная пониманием трех негравитационных взаимодействий, составляющих стандартную модель элементарных частиц.

Стандартная модель элементарных частиц, стандартная модель, стандартная теория. Весьма успешная теория, описывающая негравитационные силы и их действие на материю. По сути, она является объединением квантовой хромодинамики и теории электрослабых взаимодействий.

Струна. Фундаментальный одномерный объект, являющийся основным понятием теории струн.

Суммирование по путям. Формулировка квантовой механики, в которой учитываются движения частиц из одной точки в другую по всем возможным путям между точками.

Супергравитация. Класс теорий (описывающих точечные частицы), в которых принципы общей теории относительности дополняются суперсимметрией.

Суперпартнеры. Частицы, спины которых отличаются на 1/2, и которые связаны преобразованием суперсимметрии.

Суперсимметричная квантовая теория поля. Квантовая теория ноля, включающая суперсимметрию.

Суперсимметричиая стандартная модель. Суперсимметричное обобщение стандартной модели элементарных частиц. Для нее характерно удвоение числа известных элементарных частиц.

Суперсимметрия. Симметрия, связывающая свойства частиц с целым спином (бозонов) со свойствами частиц с полуцелым спином (фермионов).

Сфера. Поверхность шара. Поверхность обычного трехмерного шара имеет два измерения (которые, аналогично поверхности Земли, можно параметризовать двумя числами – «широтой» и «долготой»). Однако понятие сферы может быть обобщено для шаров и их поверхностей в любом числе измерений. Одномерная сфера есть необычное название окружности, нульмерная сфера состоит из двух точек (это объясняется в основном тексте книги). Трехмерную сферу представить сложнее: она является поверхностью четырехмерного шара.

Тахион. Частица, квадрат массы которой отрицателен; ее присутствие в теории обычно приводит к несостоятельности теории.

Теории Калуцы-Клейна. Класс квантовых теорий, содержащих свернутые измерения.

Теории супергравитации высших размерностей. Класс теорий супергравитации, в которых число пространственно-временных измерений больше четырех.

Теория 11-мерной супергравитации. Перспективная многомерная теория супергравитации, разработанная в 1970-х гг., затем почти забытая, а впоследствии оказавшаяся важной частью теории струн.

Теория бозонных струн. Первая из известных теорий струн; все ее колебательные моды – бозонные.

Теория возмущений. Формализм для упрощения сложной задачи поиска приближенного решения, в процессе которого решение последовательно уточняется путем систематического учета информации, полученной на предыдущих этапах.

Теория всего. Квантово-механическая теория, объединяющая все взаимодействия и типы материи.

Теория Е-гетеротических струн; теория гетеротических струн с группой симметрии Е8 х Е8. Одна из пяти теорий суперструн; описывает замкнутые струны, правые колебательные моды которых похожи на моды струн типа II, а левые колебательные моды включают моды бозонных струн. Имеет важные, но нетривиальные отличия от теории 0-гетеротических струн.

Теория О-гетеротических струн; теория гетеротических струн с группой симметрии O(32). Одна из пяти теорий суперструн; описывает замкнутые струны, правые колебательные моды которых похожи на моды струн типа II, а левые колебательные моды включают моды бозонных струн. Имеет важные, но нетривиальные отличия от теории Е-гетеротических струн.

Теория Максвелла, теория электромагнитных взаимодействий. Теория, объединяющая

электричество и магнетизм, предложенная Максвеллом в 1880-е годы и основанная на понятии электромагнитного поля; доказывает, что видимый свет является примером электромагнитной волны.

Теория с сильной связью. Теория, в которой константа связи струны больше 1.

Теория со слабой связью. Теория, в которой константа связи струны меньше 1.

Теория струн. Объединенная теория мироздания, в которой постулируется, что фундаментальными объектами в природе являются не нульмерные точечные частицы, а крошечные одномерные иити, называемые струнами. В теории струн гармонически сочетаются квантовая механика и общая теория относительности – ранее известные законы малого и большого, – являющиеся во всех других случаях несовместимыми. Часто «теория струн» является сокращением от «теории суперструн».

Теория струн типа I. Одна из пяти теорий суперструн; включает как открытые, так и замкнутые струны.

Теория струн типа IIA. Одна из пяти теорий суперструн; включает замкнутые струны с симметрией между правыми и левыми колебательными модами.

Теория струн типа ИВ. Одна из пяти теорий суперструн; включает замкнутые струны с асимметрией между правыми и левыми колебательными модами.

Теория сунерструн. Суперсимметричное обобщение теории струн.

Теория электрослабых взаимодействий. Релятивистская квантовая теория поля, описывающая слабые взаимодействия и электромагнитные взаимодействия в рамках единого формализма.

Термодинамика. Установленные в XIX в. законы, описывающие свойства, связанные с теплотой, работой, энергией, энтропией, и взаимосвязь между ними в ходе эволюции физической системы.

Топологическая мода. Конфигурация струны, намотанной вокруг циклического пространственного измерения.

Топологически неэквивалентные. Два многообразия, которые нельзя продеформировать одно в другое без какого-либо повреждения их структуры.

Топологический вклад в энергию. Энергия струны, намотанной вокруг циклического измерения пространства.

Топологическое число. Число витков струны вокруг циклического пространственного измерения.

Топология. Разбиение многообразий иа группы, в каждой из которых одно многообразие можно продеформировать в другое без какого-либо разрыва или повреждения структуры.

Тор. Двумерная поверхность «бублика».

Тор с несколькими ручками. Обобщение многообразия тора на случай более одного отверстия.

Трехмерная сфера. См. сфера.

Туннель. Трубообразная область пространства, соединяющая одну часть Вселенной с другой.

Ультрамикроскопические. Масштабы длин короче планковской длины (а также временные масштабы короче платовского времени).

Уравнение Клейна-Гордоиа. Фундаментальное уравнение релятивистской квантовой теории поля.

Уравнение Шредингера. Уравнение, описывающее эволюцию воли вероятности в квантовой механике.

Ускорение. Изменение скорости объекта или его направления движения. См. также скорость.

Ускоритель частиц. Установка для разгона частиц до скорости, близкой к скорости света, и для сталкивания их друг с другом с целью изучения структуры материи.

Фаза. Применительно к веществу фаза означает одно из его возможных состояний:

твердая фаза, жидкая фаза, газообразная фаза. В обшем случае фаза относится к возможным описаниям физической системы при изменении параметров, от которых зависит система (например, температуры, значения константы связи струны, вида пространства-времени и т.д.).

Фазовый переход. Эволюция физической системы от одной фазы к другой.

Фейимаиовское суммирование по путям. См. суммирование по путям.

Фермнои. Частица или колебательная мода струны, имеющая полуцелый спин и обычно являющаяся частицей материи.

Флоп-перестройка. Эволюция компоненты Калаби-Яу всего пространства, при которой ее структура разрывается и склеивается заново, при этом изменения физических характеристик малы и допустимы в рамках теории струн.

Флоп-перестройка с разрывом пространства. См. флопперестройка.

Фотои. Минимальный пакет электромагнитного поля; частица, передающая электромагнитные взаимодействия; наименьший сгусток света.

Фотоэффект. Явление выбивания электронов с поверхности металлов под действием света.

Частица, передающая взаимодействие. Наименьший сгусток поля сил; микроскопический переносчик взаимодействия.

Частота. Число полных периодов волновых колебаний в секунду.

Черная дыра. Объект, гравитационное поле которого настолько сильно, что способно захватывать все, что подойдет достаточно близко (ближе горизонта событий черной дыры), даже свет.

Шкала Кельвина. Шкала температур, в которой отсчет идет относительно абсолютного нуля.

Экстремальные черные дыры. Черные дыры, обладающие максимально возможным количеством заряда при данной полной массе.

Электромагнитная волна. Волнообразное возмущение электромагнитного поля; электромагнитные волны распространяются со скоростью света. Примеры: видимый свет, рентгеновские лучи, радиоволны, инфракрасное излучение.

Электромагнитное взаимодействие, электромагнитные силы. Одно из четырех типов фундаментальных взаимодействий, объединяющее электрические и магнитные силы.

Электромагнитное излучение. Перенос энергии электромагнитной волной.

Электромагнитное поле. Силовое поле электромагнитных сил, состоящее из силовых электрических и магнитных линий в каждой точке пространства.

Электрон. Отрицательно заряженная частица, вращающаяся по орбите вокруг ядра атома.

Энтропия. Мера беспорядка в физической системе; число перегруппировок компонент системы, не приводящих к изменению ее общего вида.

Энтропия черной дыры. Энтропия, характеризующая черную дыру.

Ядро. Сердцевина атома, состоящая из протонов и нейтронов.

2-брана. См. брана.

3-браиа. См. брана.

W-бозои. См. калибровочный бозон слабого взаимодействия.

Z-бозои. См. калибровочный бозон слабого взаимодействия.

Рекомендуемая литература

Abbot Edwin A. Flatland: A Romance of Many Dimensions.

Princeton: Princeton University Press, 1991. (Рус. пер.:

Эббот Э. Флатляндия. М.: Амфора, 2001.) Barrow John D. Theories of Everything. New York: Fawcett-

Columbine, 1992. Bronowski Jacob. The Ascent of Man. Boston: Little, Brown,

1973. Clark Ronald W. Einstein, The Life and Times. New York:
Avon, 1984.
Crease Robert P., and Charles C Mann. The Second Creation. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press,
1996. Davies P. C W. Superforce. New York: Simon Schuster,
1984. (Рус. пер.: Девис П. Суперсила. Поиски единой
теории природы. М.: Мир, 1989.) Davies P. C. W. and J. Brown, eds. Supers/rings: A Theory
of Everything? Cambridge, Eng.: Cambridge University
Press, 1988. Deutsch David. The Fabric of Reality. New York: Alien Lane,
1997. (Рус. пер.: Дойч Д. Структура реальности.
Ижевск: РХД.2001.)
Einstein Albert. The Meaning of Relativity. Princeton: Princeton University Press, 1988.
Einstein Albert. Relativity. New York: Crown, 1961. Ferns Timothy. Coming of Age in the Milky Way. New York:
Anchor, 1989. Ferns Timothy. The Whole Shebang. New York: Simon
Schuster, 1997.
Folsing Albrecht. Albert Einstein. New York: Viking, 1997. Feynman Richard. The Character of Physical Law. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995. (Рус. пер.: Фе'инман Р.
Характер физических законов. М.: Мир, 1968.) Gamow George. Mr. Tompkins in Paperback. Cambridge,
Eng.: Cambridge University Press, 1993. (См. рус.
изд.: Гамов Г. Мистер Томпкинс в Стране Чудес,
или истории о c, G и Л. М.: УРСС, 2003; Гамов Г.
Мистер Томпкинс исследует атом. М.: УРСС, 2003.) Gell-Mann Murray. The Quark and the Jaguar. New York:
Freeman, 1994. Glashow Sheldon. Interactions. New York: Time-Warner
Books, 1988. Guth Alan H. The Inflationary Universe. Reading, Mass.:
Addison-Wesley, 1997.
Hawking Stephen. A Brief History of Time. New York: Bantam Books, 1988. (Рус. пер.: Хокинг С. От Большого взрыва до черных дыр. М.: Мир, 1990.)
Hawking Stephen, and Roger Penrose. The Nature of Space and Time. Princeton: Princeton University Press, 1996. (Рус. пер.: Хокинг С, Пенроуз Р. Природа пространства и времени. Ижевск: РХД, 2000.)
Hey Tony and Patrick Walters. Einstein's Mirror. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997.
Kaku Michio. Beyond Einstein. New York: Anchor, 1987.
Kaku Michio. Hyperspace. New York: Oxford University Press, 1994.
Lederman Leon, with Dick Teresi. The God Panicle. Boston: Houghton Mifflin, 1993.
Lindley David. The End of Physics. New York: Basic Books, 1993.
Lindley David. Where Does the Weirdness Go? New York: Basic Books, 1996.
Overbye Dennis. Lonely Hearts of the Cosmos. New York: HarperCollins, 1991.
Pais Abraham. Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein. New York: Oxford University Press, 1982. (Рус. пер.: Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, Физматлит, 1989.)
Penrose Roger. The Emperor's New Mind. Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1989. (Рус пер.: Пенроуз Р. Новый ум короля. М.: УРСС, 2003.)
Rees Martin J. Before the Beginning. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.
Smolin Lee. The Life of the Cosmos. New York: Oxford University Press, 1997.
Thorne Kip. Black Holes and Time Warps. New York: Norton, 1994.
Weinberg Steven. The First Three Minutes. New York: Basic Books, 1993. (Рус. пер.: Вайнберг. С. Первые три минуты. М.: Мир, 1981.)

Weinberg Steven. Dreams of a Final Theory. New York: Pantheon, 1992. (Рус. пер.: Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: УРСС, 2004.)

Wheeler John A. A Journey into Gravity and Spacetime. New York: Scientific American Library, 1990.